



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE141599

**MENENTUKAN CRITICAL CLEARING TIME PADA
MULTI MESIN BERBASIS CRITICAL TRAJECTORY
DAN GENERATOR KRITIS DENGAN MEMPER-
TIMBANGKAN GANGGUAN UNBALANCED**

Wahyu Dwi Saputro
NRP 2211 100 013

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Feby Agung Pamuji, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



FINAL PROJECT - TE141599

***DETERMINING CRITICAL CLEARING TIME ON
MULTI MACHINE BASED ON CRITICAL
TRAJECTORI DAN CRITICAL GENERATOR TO
CONSIDER UNBALANCED FAULT***

Wahyu Dwi Saputro
NRP 2211 100 013

Lecturer
Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng.
Feby Agung Pamuji, ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2015

**MENENTUKAN *CRITICAL CLEARING TIME* PADA MULTI
MESIN BERBASIS *CRITICAL TRAJECTORY* DAN GENERATOR
KRITIS DENGAN MEMPERTIMBANGKAN GANGGUAN
*UNBALANCED***

TUGAS AKHIR

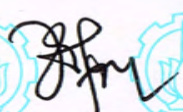
Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada

Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

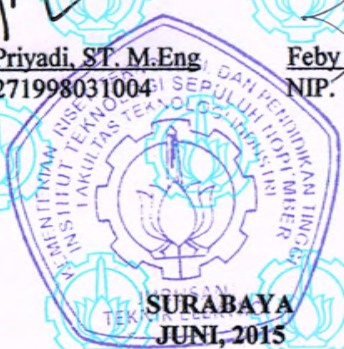
Dosen Pembimbing II


Dr. Ardyono Priyadi, ST, M.Eng

NIP. 197309271998031004


Feby Agung Pamuji, ST., MT.

NIP. 198702062012121002


**SURABAYA
JUNI, 2015**

MENENTUKAN *CRITICAL CLEARING TIME* PADA MULTI MESIN BERBASIS *CRITICAL TRAJECTORY* DAN GENERATOR KRITIS DENGAN MEMPERTIMBNGKAN GANGGUAN *UNBALANCED*

Nama : Wahyu Dwi Saputro
Pembimbing I : Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST,M.Eng.
Pembimbing II : Feby Agung Pamuji ST.,MT.

ABSTRAK

Kestabilan transient memiliki peranan penting dalam sistem tenaga listrik. Pada saat terjadi gangguan, rele pengaman akan terbuka dalam waktu sekitar 0,2 detik. Akan tetapi hal ini tidak menjamin sistem akan kembali pada kondisi *steady-state*. Hal ini disebabkan adanya waktu pemutus kritis / *critical clearing time (cct)* pada sistem tenaga listrik. Jika gangguan diputus kurang dari waktu kritisnya/ *critical clearing time (cct)*, maka generator akan kembali stabil. Namun, jika gangguan diputus lebih dari waktu kritisnya/ *critical clearing time (cct)*, maka generator akan berada pada kondisi tidak stabil. Dalam tugas akhir ini akan dihitung *critical clearing time (cct)* pada banyak generator menggunakan metode *energy function* untuk menentukan *Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP)* dengan mempertimbangkan gangguan hubung singkat tidak seimbang. Penelitian selama ini hanya mempertimbangkan hubung singkat tiga fasa ke tanah, sedangkan hubung singkat yang sering terjadi pada sistem adalah hubung singkat tidak seimbang. Metode *energy function* dapat mengetahui generator mana yang mempunyai energi terbesar yang dijadikan generator kritis, nilai dari generator kritis ini yang dapat mencapai nilai *critical point*. Selain itu, metode ini merupakan metode perhitungan prediksi yang cepat, selisih waktu perhitungan dengan metode klasik *Time Domain Simulation* mencapai 116,137 detik untuk sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson.

Kata Kunci : *critical clearing time (cct)*, *energy function*, generator kritis, *Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP)*, Kestabilan Transien.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DETERMINING CRITICAL CLEARING TIME ON MULTI MACHINE BASED ON CRITICAL TRAJECTORI DAN CRITICAL GENERATOR TO CONSIDER UNBALANCED FAULT

Nama : Wahyu Dwi Saputro
Pembimbing I : Dr.Eng. Ardyono Priyadi, ST,M.Eng.
Pembimbing II : Feby Agung Pamuji ST.,MT.

ABSTRACT

Transient stability analysis has an important role in the operation of the power system. For example during the interruption, the safety relay will work to open the *breaker* in less than 0.2 second. However, this doesn't guarantee the system will return to steady state conditions. This was caused by the critical clearing time (cct) of breaker on the electric power system. If fault was eliminated before critical clearing time (cct), generator will be stabilized. But, if fault was eliminated after critical clearing time (cct), generator will return unstable. In this final task will be counted the critical clearing time (cct) in multi machine using energy function to determined CUEP (Controlling Unstable Equilibrium Point) by considering the unbalanced fault. During this study about transient stability only consider the symmetrical fault, in real power system unsymmetrical fault is more often than symmetrical fault. Energy Function method can see the greatest energy and it be the critical generator which reach the critical point. Furthermore, this method is fast prediction method, difference between *Time Domain Simulation* and this method about 116.137 seconds for Fouad Anderson system.

Key Words : *critical clearing time (cct), energy function, critical generator, Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP), Transient Stability.*

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil ‘Alamin, puja dan puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan karunia yang tidak terkira berupa kekuatan, kesabaran, dan kelancaran sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir “**Menentukan Critical Clearing Time pada Multi Mesin Berbasis Critical Trajectory dan Generator Kritis dengan Mempertimbangkan Gangguan Unbalanced**”. Adapun tujuan dari penyusunan tugas akhir ini adalah untuk menyelesaikan salah satu persyaratan dalam menyelesaikan studi pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang banyak berjasa terutama dalam penyusunan tugas akhir ini, yaitu :

1. Segenap keluarga penulis, Ibunda Tatik Herawati, Ayahanda Muhlisin serta adik tercinta Ari Tri Wahyuni dan Catur Wahyu Prasetyo yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan do’a yang tiada hentinya untuk keberhasilan penulis.
2. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. selaku dosen pembimbing 1 penulis yang telah rela meluangkan banyak waktu, memberikan saran, bimbingan, dan bantuan yang tidak ternilai dalam menyelesaikan tugas akhir ini kepada penulis.
3. Bapak Feby Agung Pamuji, ST., MT. selaku dosen pembimbing 2 penulis yang telah membimbing dan mendukung penulis agar dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
4. Seluruh rekan asisten dan penghuni LIPIST “B-204” yang membantu kelancaran tugas akhir ini mas Isa, mas Wahyu, mas Andikta, mas Dimas, mas Iskandar, mas Ony, mas Nata, Tepe, Feisal, Gatel, BHS, Mpok, Maya, Ruli, Esi, Nurul, Evandro, Surip, Viko, Iqbal, Raki, Yudis, Wakil, Disput, Yahya, Cimeng, Irul, Ipul, Talitha, Riska, Kezia, bapak Andi, bapak Alam, ibu Ratna, bapak Anang, bapak Lie, dan bapak ibu S3 lainnya. Terima kasih seluruh bantuan, ilmu, support, canda tawa, dan doanya. Kenangan kalian tidak akan pernah terlupakan.
5. Aprichyrlia Puspita Devi, wanita yang selalu menjadi inspirasi penulis, yang telah memberikan dukungan, waktu, motivasi, serta doa yang tidak terhitung jumlahnya kepada penulis.

6. Seluruh dosen LIPIST “B-204” bapak Heri, bapak Margo, bapak Ardyono, bapak Sidar yang selalu mempermudah birokrasi dan telah sangat ramah kepada penghuni lab termasuk penulis.
7. Rekan rekan gokil K3B yang selalu memberikan semangat dan selalu setia menemani dikala suka dan duka Agung, Entong, Kuntet, Ajiz, Doni, Dahlan, Ucup, Gatel, Wahyu, Tepe, Sodik.
8. Rekan rekan kontrakan Irfan, Dar, Sum, Mahyadi, Alif, Slamet, dan Yoga yang selalu memberikan dukungan dan menemani selama kuliah di ITS Surabaya.
9. Seluruh rekan E-51 atas kebersamaan dan kerjasamanya selama ini. Terima kasih, semoga sukses selalu.
10. Seluruh keluarga besar Teknik Elektro ITS, para dosen, karyawan, mahasiswa, serta rekan-rekan HIMATEKTRO atas dukungan, masukan, dan kerjasamanya selama masa kuliah dan proses pengerjaan tugas akhir.

Kadang kita lupa, bahwa untuk melihat diri kita, jalan terbaik adalah melalui mata orang lain. Besar harapan penulis agar tugas akhir ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi banyak pihak. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik, koreksi, dan saran dari pembaca yang bersifat membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik.

Surabaya, Mei 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	HALAMAN
JUDUL	
LEMBAR PERNYATAAN	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xv
 BAB 1 PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Metodologi.....	3
1.5 Relevansi.....	5
1.6 Sistematika.....	5
 BAB 2 DASAR TEORI	
2.1 Kestabilan Sistem	7
2.1.1 Kestabilan Tegangan.....	9
2.1.2 Kestabilan Frekuensi.....	9
2.1.3 Kestabilan Sudut Rotor	10
2.2 Kestabilan Transien.....	10
2.3 Persamaan Ayunan.....	11
2.4 <i>Energy Funtion</i>	13
2.5 Gangguan Hubung Singkat Tidak Simetri	15
2.5.1 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa.....	17
2.5.2 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa	17
2.6 <i>Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP)</i>	18
2.7 Lintasan Kritis (<i>Critical Trajectory</i>).....	19
2.8 Kumparan Peredam (<i>Damper Winding</i>).....	20
 BAB 3 PEMODELAN SISTEM	
3.1 Aliran Daya (<i>Power Flow</i>).....	21

3.1.1	<i>Newton Raphson</i>	22
3.1.2	Matrik <i>Jacobian</i>	24
3.2	Reduksi Matriks Jaringan	26
3.3	<i>Energy Function</i> untuk Menentukan Energi Setiap Generator	27
3.4	Metode Runge-Kutta orde ke-4 untuk Memodelkan Kondisi <i>pre-fault</i> dan <i>on-fault</i> Sistem	28
3.5	Pemodelan <i>SEP</i> dan <i>UEP</i> untuk Sistem 2 Generator	29
3.6	Metode <i>Critical Trajectory</i>	31
3.6.1	Modifikasi Metode <i>Trapezoidal</i>	31
3.6.2	Kondisi Batas (<i>Boundary Condition</i>)	32
3.6.2	Pemilihan <i>Critical Generator</i>	34
3.7	Menentukan Nilai CCT (<i>Critical Clearing Time</i>)	35

BAB 4 SIMULASI DAN ANALISA DATA

4.1	Critical Clearing Time pada Sistem 3-Generator 9-Bus Fouad Anderson dengan Mempertimbangkan Gangguan Hubung Singkat Tidak Seimbang	37
4.1.1	Parameter yang dibutuhkan untuk Perhitungan CCT	39
4.1.2	Perhitungan CCT pada Sistem 3 Generator 9 bus Fouad Anderson dengan Mempertimbangkan Gangguan Hubung Singkat Tidak Seimbang	40
4.1.3	Analisa Grafik pada Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad Anderson dengan Mempertimbangkan Gangguan Hubung Singkat Tidak Seimbang	44
4.2	Critical Clearing Time pada Sistem IEEE57 7 Generator 57Bus dengan Mempertimbangkan Gangguan Hubung Singkat Tidak Seimbang	53
4.2.1	Parameter yang dibutuhkan untuk Perhitungan CCT	54
4.2.2	Perhitungan Critical Clearing Time pada sistem IEEE57 7 Generator 57 Bus dengan Mempertimbangkan Hubung Singkat Tidak Seimbang	62
4.2.3	Analisa Grafik pada Sistem IEEE57 7 Generator 57 Bus dengan Mempertimbangkan Gangguan Hubung Singkat Tidak Seimbang	65

BAB 5 PENUTUP

5.1	Kesimpulan	75
5.2	Saran	75

DAFTAR PUSTAKA	77
BIODATA PENULIS.....	79
LAMPIRAN.....	81

Halaman Ini Sengaja Dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Spesifikasi data saluran transmisi sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson untuk impedansi urutan positif dan urutan negatif.....	39
Tabel 4.2	Spesifikasi data saluran transmisi sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson untuk impedansi urutan nol.....	39
Tabel 4.3	Spesifikasi data bus sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson	40
Tabel 4.4	Parameter yang didapatkan dari hasil <i>power flow</i>	40
Tabel 4.5	Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan <i>critical trajectory</i> dan TDS pada sistem 3 generator 9 bus dengan gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.....	41
Tabel 4.6	Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan <i>critical trajectory</i> dan TDS pada sistem 3 generator 9 bus dengan gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.....	42
Tabel 4.7	Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan <i>critical trajectory</i> dan TDS pada sistem 3 generator 9 bus dengan gangguan hubung singkat antara 2 fasa langsung.....	42
Tabel 4.8	Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan <i>critical trajectory</i> dan TDS pada sistem 3 generator 9 bus dengan gangguan hubung singkat 3 fasa.....	43
Tabel 4.9	Spesifikasi data saluran transmisi sistem 7 generator 57 bus IEEE57 untuk impedansi urutan positif dan negatif.....	54
Tabel 4.10	Spesifikasi data saluran transmisi sistem 7 generator 57 bus IEEE57 untuk impedansi urutan nol.....	57
Tabel 4.11	Spesifikasi data bus sistem 7 generator 57 bus IEEE57	59
Tabel 4.12	Parameter yang didapat dari <i>power flow</i>	61
Tabel 4.13	Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan <i>critical trajectory</i> dan TDS pada sistem 7 generator dengan gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah.....	62
Tabel 4.14	Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan <i>critical trajectory</i> dan TDS pada sistem 7 generator dengan gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.....	63
Tabel 4.15	Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan <i>critical trajectory</i> dan TDS pada sistem 7 generator dengan gangguan hubung singkat dua fasa langsung.....	63

Tabel 4.16 Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan *critical trajectory* dan TDS pada sistem 7 generator dengan gangguan hubung singkat tiga fasa langsung..... 64

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Metodologi tugas akhir	4
Gambar 2.1	Klasifikasi kestabilan sistem tenaga.....	8
Gambar 2.2	Skema perilaku generator ketika terjadi gangguan	11
Gambar 2.3	Mempresentasikan suatu rotor generator yang membandingkan arah perputaran serta momen putar mekanis dan listrik.....	12
Gambar 2.4	<i>Energy function</i> kondisi pertama	14
Gambar 2.5	<i>Energy function</i> kondisi kedua.....	14
Gambar 2.6	<i>Energy function</i> kondisi ketiga.....	14
Gambar 2.7	Hubungan dari urutan fasa pada gangguan satu fasa ke tanah.....	17
Gambar 2.8	Hubungan dari urutan fasa pada gangguan anatar dua fasa dengan impedansi.....	18
Gambar 2.9	Ilustrasi metode CUEP (<i>Controlling Unstable Equilibrium Point</i>)	18
Gambar 2.10	Ilustrasi gambar <i>Critical trajectory</i>	19
Gambar 2.11	Penggambaran Sederhana Rotor Dua Kutub Menonjol dengan <i>Damper Winding</i>	20
Gambar 3.1	Ilustrasi Metode <i>Newton Raphson</i>	22
Gambar 3.2	Permodelan Generator Saat Terjadi Gangguan	29
Gambar 3.3	Konsep modifikasi metode Trapezoidal.....	32
Gambar 3.4	Konsep <i>CCT (Critical Clearing Time)</i>	35
Gambar 4.1	Sistem 3-generator 9-bus Fouad Anderson	38
Gambar 4.2	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila mengalami gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah terjadi di titik A.....	45
Gambar 4.3	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah terjadi di titik A.....	46
Gambar 4.4	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator dengan <i>damping</i> bila gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah terjadi di titik A.....	46

Gambar 4.5	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila mengalami gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah terjadi di titik A.....	47
Gambar 4.6	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah terjadi di titik A	48
Gambar 4.7	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator degan <i>damping</i> bila gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah terjadi di titik A	48
Gambar 4.8	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila mengalami gangguan hubung singkat dua fasa langsung terjadi di titik C.....	49
Gambar 4.9	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila mengalami gangguan hubung singkat dua fasa langsung terjadi di titik C.....	50
Gambar 4.10	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator degan <i>damping</i> bila gangguan hubung singkat dua fasa langsung terjadi di titik C	50
Gambar 4.11	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila mengalami gangguan hubung singkat 3 fasa terjadi di titik D	51
Gambar 4.12	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus dengan <i>damping</i> bila mengalami gangguan hubung 3 fasa terjadi di titik D	52
Gambar 4.13	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator degan <i>damping</i> bila gangguan hubung singkat 3 fasa terjadi di titik D	52
Gambar 4.14	Sistem 7-generator 57-bus IEEE57	53

Gambar 4.15	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem IEEE-57 dengan <i>damping</i> bila mengalami gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah di titik A.....	66
Gambar 4.16	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem IEEE-57 dengan <i>damping</i> bila mengalami gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah terjadi di titik A.....	67
Gambar 4.17	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem IEEE-57 dengan <i>damping</i> bila mengalami gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah terjadi di titik A	67
Gambar 4.18	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem IEEE-57 dengan <i>damping</i> bila mengalami gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah terjadi di titik B.....	68
Gambar 4.19	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem IEEE-57 dengan <i>damping</i> bila mengalami gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah terjadi di titik B	69
Gambar 4.20	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem IEEE-57 dengan <i>damping</i> bila mengalami gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah terjadi di titik B	69
Gambar 4.21	Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem IEEE-57 dengan <i>damping</i> bila mengalami gangguan hubung singkat antara dua fasa langsung di titik C.....	70
Gambar 4.22	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem IEEE-57 dengan <i>damping</i> bila mengalami gangguan hubung singkat antara dua fasa langsung terjadi di titik C.....	71
Gambar 4.23	Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem IEEE-57 dengan <i>damping</i> bila mengalami gangguan hubung singkat dua fasa langsung terjadi di titik C	71

Gambar 4.24 Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam **rad** terhadap waktu (s) pada sistem IEEE-57 dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat tiga fasa terjadi di titik D 72

Gambar 4.25 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam **rad/s** terhadap waktu (s) pada sistem IEEE-57 dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat tiga fasa terjadi di titik D 73

Gambar 4.26 Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam **rad/s** terhadap sudut rotor (δ) dalam **rad** pada sistem IEEE-57 dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah terjadi di titik D 73

RIWAYAT HIDUP



Wahyu Dwi Saputro adalah nama lengkap penulis yang lahir di kota Kediri pada tanggal 8 Oktober 1992. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara pasangan Muhlisin dan Tatik herawati. Memulai pendidikannya dari TK. Kartanegara II Kediri kemudian melanjutkan studi di SDN Mojoroto II Kediri, SLTP Negeri 4 Kediri, dan SMA Negeri 2 Kediri. Setelah lulus dari SMA pada tahun 2011, penulis melanjutkan studi di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya melalui jalur

SNMPTN undangan pada tahun yang sama. Konsentrasi penulis adalah pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga dan selama kuliah, penulis aktif menjadi asistem laboratorium Instrumentasi, Pengukuran, dan Identifikasi Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Sejak tahun kedua perkuliahan, penulis mulai belajar wirausaha dalam bidang jasa tour dan travel se-Indonesia, mendirikan biro perjalanan “Wahyu Tour”. Penulis dapat dihubungi melalui email wahyusaputrodwi@gmail.com.

-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada dasarnya, kestabilan merupakan suatu kemampuan dari sistem untuk melawan gangguan yang terjadi dan berusaha mengembalikan ke keadaan normal. Bila dihubungkan dalam sistem kelistrikan, analisa stabilitas transien mempunyai peranan yang penting untuk memelihara/menjaga keamanan operasi sistem tenaga listrik, yaitu dengan memperhitungkan apakah sistem akan tetap dalam keadaan serempak setelah terjadi gangguan besar, misal adanya motor besar yang starting, perubahan beban yang mendadak, terputusnya unit pembangkit, gangguan pada saluran transmisi, dan lain sebagainya. Maka dengan analisa kestabilan transien, dapat dianalisa gangguan yang terjadi bersumber di daerah mana, sehingga dapat segera dilakukan perawatan dan kedepannya dapat diantisipasi agar tidak terjadi hal yang serupa.

Selama ini analisa kestabilan pada umumnya dilakukan setelah sebuah plan mengalami kegagalan akibat gangguan yang besar. Akibatnya kerugian dari pihak produsen pun juga tidak dapat dihindari lagi. Untuk kedepannya diharapkan terdapat sebuah analisa kestabilan yang dapat dilakukan sebelum terjadi kegagalan atau secara real time, sehingga kerugian dari produsen / pemilik pabrik dapat diminimalisir sekecil mungkin. Menurut penelitian dari proses-proses tersebut, metode yang populer digunakan adalah menggunakan numerical simulation / *Time Domain Simulation (TDS)*, dimana dalam perhitungan menentukan *Critical Clearing Time (CCT)* nya diperoleh dengan menggunakan metode integrasi numerik secara bertahap dari kondisi awal yang ditentukan. Selama ini, numerical simulation selalu memakan waktu lama dalam pengoperasiannya, dan hal tersebutlah yang menjadi penyebab metode ini tidak dapat dimanfaatkan untuk analisa kestabilan secara real time. Beberapa tahun yang lalu, ditemukan metode menentukan *CCT* secara langsung yang dinamakan dengan metode trajektori kritis / *Critical Trajectory*. Keunggulan metode baru ini adalah dapat menentukan nilai *CCT* dengan lebih cepat dan akurat, dan di masa depan diharapkan dapat diterapkan untuk analisa kestabilan transien secara *online / real time*. Tetapi penggunaan metode ini

pada pembahasan sebelumnya masih belum sempurna, dimana masih belum mempertimbangkan *unbalanced fault*. Dalam sistem kelistrikan gangguan tidak seimbang lebih sering terjadi daripada gangguan 3 fasa ke tanah.

Dalam tugas akhir ini, diusulkan metode baru pada analisa kestabilan transien, yang menggunakan metode *critical trajectory* dan generator kritis dengan mempertimbangkan *unbalanced fault*. Pada penelitian sebelumnya [4] analisa dilakukan untuk gangguan 3 fasa ke tanah dengan kontroller menggunakan AVR dan *governor*. Namun, pada keadaan *unbalanced fault* analisa ini belum pernah dilakukan dengan metode yang sama. Keunggulan dari metode ini adalah dapat menentukan nilai *CCT* dengan cepat dan tepat dalam beberapa jenis gangguan. Sehingga hal ini bisa dijadikan dasar dari analisa kestabilan transien secara real-time / online. Dalam perhitungannya sendiri, trajektori kritis adalah lintasan / jalur dari titik *CCT* sampai titik end point yaitu *UEP (Unstable Equilibrium Point)*. Setiap mesin memiliki nilai *UEP* sendiri. Karena disini saya tidak hanya menggunakan satu mesin (*single machine*), tapi menggunakan multi mesin (*multi machine*), mengakibatkan nilai *UEP* tidak dapat diperhitungkan, karena akan berbeda pada setiap mesin. Sehingga perlu dilakukan pengontrolan dulu, dan teknik ini disebut *CUEP (Controlling Unstable Equilibrium Point)* dengan menggunakan metode *BCU Shadowing* untuk memperoleh nilainya.

1.2 Perumusan Masalah

Pada tugas akhir ini yang menjadi permasalahan adalah mendapatkan nilai *CCT* pada sistem *multi machine* menggunakan *critical trajectory* dan generator kritis dengan *unbalanced fault*.

1.3 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan nilai *CCT* dengan metode trajektori kritis dan generator kritis pada sistem multi mesin dengan *unbalanced fault* dalam perhitungannya. Sehingga, hasilnya mampu memberikan suatu gambaran terhadap kestabilan transient suatu sistem multi mesin yang mendapatkan gangguan hubung singkat tidak seimbang.

1.4 Metodologi

1. Studi Literatur

Penulis mencari referensi bahan melalui buku, jurnal ilmiah (*paper*), dan *browsing* di internet tentang artikel-artikel dan pembahasan yang berhubungan dengan analisa transient serta perkembangan metodenya setiap kurun waktu, dari *BCU Shadowing* sampai *Unbalanced Fault* pada sistem *multi machine*.

2. Perencanaan Program

Menginputkan parameter mesin yang digunakan untuk dimasukkan dalam formulasi perhitungan. Formulasi perhitungan dilakukan untuk menunjang pemodelan sistem dan simulasi yang akan dilakukan. Kemudian dari struktur data formulasi perhitungan tersebut dibuatlah struktur logika berupa diagram alir untuk proses pembuatan program dengan matlab.

3. Simulasi dan Pemodelan

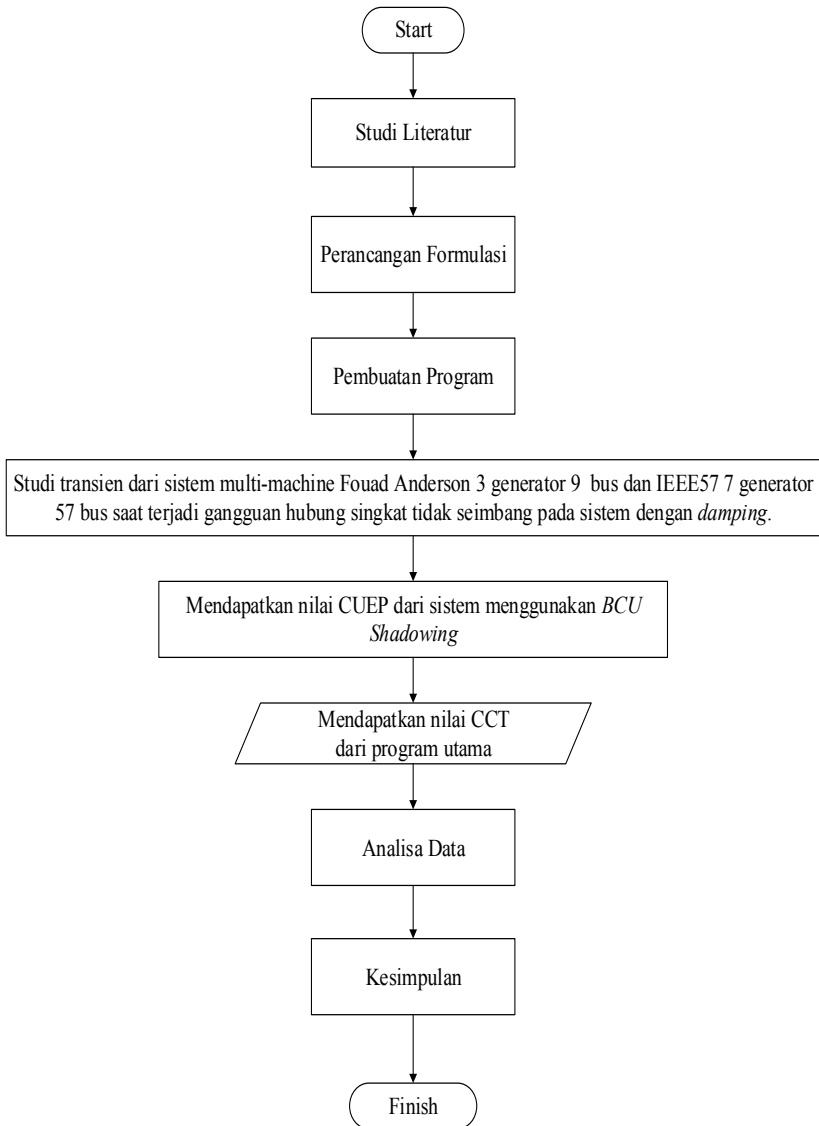
Melakukan studi transient pada sistem *multi-machine* Fouad Anderson 3 generator 9 bus dan pada sistem *multi-machine* 7 generator 57 bus saat terjadi gangguan, dengan menggunakan beberapa jenis gangguan hubung singkat tidak seimbang, lalu dibuat pemodelan simulasinya. Kemudian berdasarkan *CUEP* dari sistem *multi-machine*, yang didapatkan dari *BCU Shadowing*, untuk selanjutnya dihitunglah nilai *CCT*.

4. Analisa data

Dari simulasi yang dilakukan akan didapatkan suatu hasil yang akan dianalisis. Data yang akan dianalisis adalah parameter-parameter *CCT* pada stabilitas transien, sehingga didapatkan pemodelan yang paling baik.

5. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan merupakan jawaban dari permasalahan yang telah dianalisis. Selain itu, akan diberikan saran yang bisa digunakan sebagai masukan berkaitan dengan apa yang telah dilakukan demi kebaikan penelitian selanjutnya.



Gambar 1.1 Metodologi Tugas Akhir

1.5 Relevansi

Manfaat dari tugas akhir ini adalah diharapkan dapat menjadi referensi studi analisa kestabilan transien secara *real-time* atau bahkan secara *online* di masa depan, guna memberikan kemudahan menganalisa fenomena transien pada plan PLN atau bahkan sistem *microgrid* yang sedang marak dilakukan studi di masa sekarang.

1.6 Sitematika

BAB I Pendahuluan

Pada bab ini membahas mengenai garis besar pengerjaan tugas akhir yang meliputi latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan, relevansi atau manfaat tugas akhir, dan sistematika penulisan. Sehingga pada bagian ini, gambaran terkait permasalahan yang diangkat dan solusi yang ditawarkan sudah terpapar dengan jelas, yaitu unuk menentukan nilai CCT pada *plant* yang digunakan.

BAB II Kestabilan Transient Sistem Tenaga Listrik

Pada bab ini membahas mengenai teori kestabilan transient, persamaan ayunan (*swing equation*), *energy function*, gangguan tidak seimbang (*unbalanced fault*), dan lintasan kritis (*critical trajectory*), kumparan peredam (*damper winding*)

BAB III Pemodelan Sistem dan Penerapan Metode

Pada bab ini membahas cara pemodelan sistem untuk perhitungan, serta penjabaran mengenai metode yang akan digunakan saat perhitungan untuk simulasi.

BAB IV Simulasi pada Plan dan Analisa Data

Pada bab keempat ini menyimulasikan metode yang telah dirancang ke plan yang sudah ditentukan sejak awal. Data hasil simulasi tersebut, yaitu parameter *CCT* pada setiap kondisi gangguan saat kondisi saat mendapatkan beberapa macam gangguan tidak seimbang. Untuk diketahui perbedaan pada masing-masing gangguan.

BAB V Penutup

Pada bab terakhir ini akan disimpulkan jawaban dari simulasi dan analisa data yang dilakukan, sehingga akan diketahui pemodelan sistem yang paling baik. Serta akan diberikan saran sebagai masukan tentang hal-hal yang telah dilakukan.

BAB II

KESTABILAN TRANSIEN

2.1 Kestabilan Sistem

Mengacu pada referensi [3] kestabilan sistem tenaga listrik didefinisikan sebagai kemampuan dari sistem untuk kembali pada keadaan normal setelah terjadi gangguan. Sistem tenaga adalah sistem yang beroperasi secara tidak linier karena beroperasi pada kondisi beban yang berubah-ubah, daya generator yang berubah-ubah ataupun keadaan lain yang berubah-ubah. Oleh karena itu, sistem yang mempunyai kestabilan yang baik adalah mampu kembali dalam keadaan normal setelah osilasi akibat perubahan dari sistem kelistrikan.

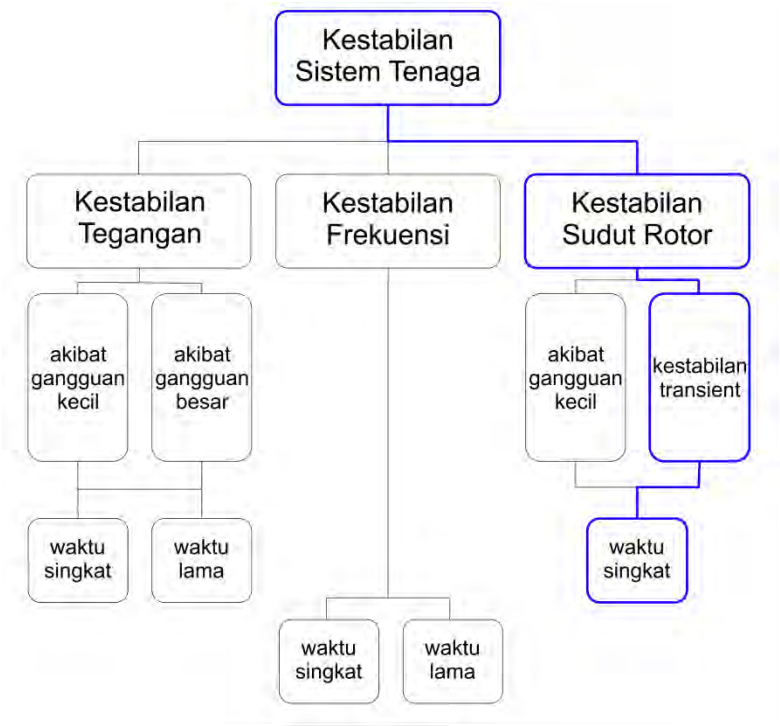
Kestabilan sistem tenaga listrik dipengaruhi oleh gangguan pada sistem, baik gangguan kecil maupun gangguan besar. Gangguan kecil dapat berupa perubahan pada beban secara terus-menerus. Sedangkan gangguan yang besar dapat berupa motor *starting*, hubung singkat saluran transmisi, atau hilangnya sinkronisasi generator dari sebuah sistem. Dalam hal ini, sistem yang baik dapat kembali dalam keadaan normal atau keadaan stabil setelah terjadi gangguan kecil maupun besar.

Keadaan seimbang atau stabil adalah tidak ada perbedaan antara daya elektrik pada sistem dan daya mekanis yang dibangkitkan dari generator. Dalam keadaan seimbang, selisih antara daya elektrik dan mekanik adalah nol. Namun, apabila terjadi gangguan maka putaran dari rotor generator akan mengalami percepatan atau perlambatan. Kelebihan daya elektrik menyebabkan putaran rotor menjadi lebih lambat karena generator terbebani melebihi kemampuannya. Sedangkan kekurangan daya elektrik dapat menyebabkan percepatan dari putaran rotor generator karena daya yang dibangkitkan dari rotor melebihi daya elektrik dari sistem. Bila hal ini tidak segera dihilangkan, maka perlambatan atau percepatan dari rotor generator mengakibatkan hilangnya sinkronisasi dari sistem. Maka dari itu diperlukan analisa kestabilan transien agar pembangkit yang terganggu tidak lepas dari sistem.

Respon dari sistem tenaga listrik sangat terkait dengan komponen penyusun dari peralatan yang digunakan. Pada umumnya generator dari sistem dilengkapi dengan beberapa rele pengaman, mulai dari *Over Current Rele*, rele diferensial, rele under voltage, rele under frekuensi, ataupun rele *reverse power*. Beberapa rele di atas digunakan untuk

merespon apabila terjadi perbedaan arus, tegangan, atau frekuensi pada tiap bus yang terhubung pada generator. Setiap perubahan tergantung karakteristik beban dan sistem itu sendiri.

Untuk mempermudah dalam analisa kestabilan sistem tenaga. Maka kami uraikan klasifikasi kestabilan sistem tenaga sesuai referensi [1]. Pada penelitian ini kestabilan lebih fokus pada kestabilan sudut rotor. Perbedaan antara daya mekanis generator dan daya elektris sistem saat terjadi gangguan yang menyebabkan terjadinya percepatan atau perlambatan perputaran sudut rotor. Sistem yang stabil akan kembali pada keadaan steady state setelah gangguan diputus.



Gambar 2.1. Klasifikasi Kestabilan Sistem Tenaga

Berdasarkan uraian [3] klasifikasi sistem tenaga dapat dibagi tiga, diantaranya adalah kestabilan tegangan, kestabilan frekuensi dan kestabilan sudut rotor.

2.1.1 Kestabilan Tegangan

Kestabilan tegangan mempunyai peranan penting dalam menjaga kestabilan sistem, sistem yang baik adalah tetap konstan saat terjadi perubahan beban. Mengacu pada referensi [12] ketidakstabilan tegangan adalah keadaan dimana tegangan pada bus tersebut *overvoltage* ataupun *undervoltage*. Keadaan yang diijinkan oleh PLN adalah +5% dan -5% untuk level tegangan 500kV dan untuk level tegangan di bawah 500kV adalah +10% dan -10%.

Keadaan *undervoltage* ini dapat diakibatkan oleh lepasnya generator dari sistem atau bertambahnya beban pada bus terganggu. Sedangkan, keadaan *overvoltage* dapat diakibatkan oleh lepasnya beban pada bus terganggu. Pada umumnya, kestabilan tegangan ini sangat erat hubungannya dengan beban, dapat berupa penambahan atau pelepasan beban. Ketidakstabilan tegangan ini dapat mengakibatkan komponen peralatan menjadi cepat panas dan juga mempersingkat umur dari peralatan itu sendiri.

2.1.2 Kestabilan Frekuensi

Mengacu pada referensi [3] kestabilan frekuensi merupakan kemampuan sistem tenaga untuk mempertahankan kestabilan frekuensi ketika terjadi gangguan sistem yang besar akibat ketidakseimbangan antara suplai daya dan beban. Biasanya gangguan ini berupa perubahan pembangkit atau beban yang signifikan. Ketidakstabilan frekuensi dapat menjadi perhatian khusus, agar tidak terdapat rugi-rugi pada beban maupun pembangkitan tenaga listrik.

Klasifikasi kestabilan frekuensi diklasifikasikan menjadi 2 yaitu jangka panjang dan jangka pendek. Kestabilan frekuensi jangka panjang disebabkan oleh kontrol *governor* tidak bekerja ketika terdapat gangguan. Rentang waktu fenomena jangka panjang yaitu puluhan detik hingga beberapa menit. Kestabilan frekuensi jangka pendek adalah terjadinya perubahan beban yang besar sehingga generator tidak mampu untuk memenuhi kebutuhan daya pada sistem. Batas frekuensi yang diperbolehkan untuk sistem agar tetap berjalan adalah +0.5 Hz dan - 0.5Hz.

2.1.3 Kestabilan Sudut Rotor

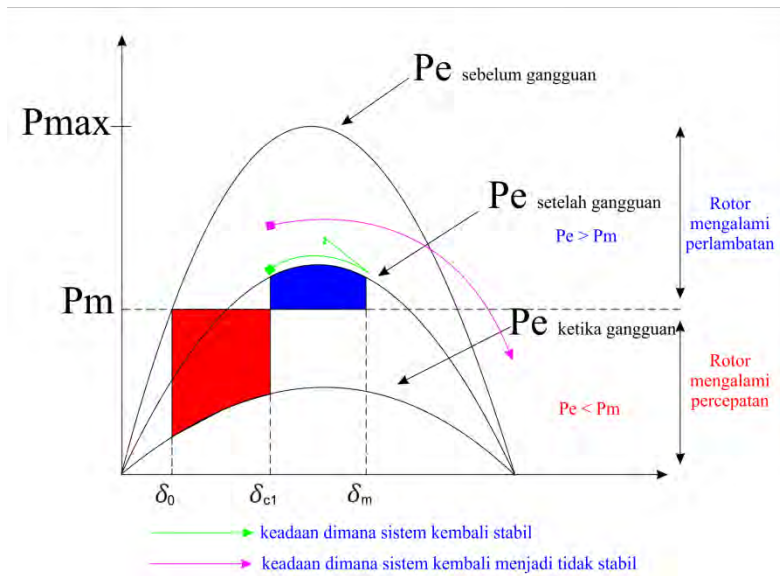
Kestabilan sudut rotor merupakan kemampuan dari motor sinkron untuk mempertahankan keadaan stabil akibat gangguan dan perbedaan antara daya mekanis dan listrik sistem. Untuk menjaga kestabilan sistem maka harus menjaga keseimbangan antar torsi elektromagnetik dan torsi mekanik pada masing-masing mesin. Ketidakstabilan sudut rotor ini dapat mengakibatkan berubahnya kecepatan sudut dari generator lain. Pada penelitian ini lebih diulas bagaimana kestabilan sudut rotor terhadap waktu setelah terjadinya gangguan.

Pada penelitian ini bagaimana respon dari sudut rotor setelah terjadi gangguan tidak seimbang. Akan digambarkan bagaimana apabila perilaku generator ketika diputus sebelum dan setelah titik kritisnya. Sistem yang baik adalah kembali normal apabila diputus sebelum titik kritisnya dan akan tidak stabil apabila diputus setelah titik kritis dari generator itu sendiri.

2.2. Kestabilan Transien

Kestabilan transien adalah kemampuan dari sistem tenaga untuk mempertahankan sinkronisasi ketika mengalami gangguan transien. Respon sistem yang dihasilkan, disebabkan adanya perubahan besar pada sudut daya generator dan dipengaruhi oleh hubungan nonlinier sudut rotor terhadap daya [1]. Masalah yang dibahas pada kestabilan transien ini lebih kompleks daripada kestabilan *steady state*. Analisis kestabilan transien harus dilakukan pada sebuah sistem untuk mengetahui apakah sistem dapat bertahan ketika dan setelah terjadi gangguan transien. Sebuah sistem dikatakan stabil ketika kondisi *steady state*, namun belum tentu stabil ketika terjadi gangguan transien.

Pada penelitian ini kestabilan transien yang dibahas adalah kestabilan sudut rotor. Perbandingan daya (P) dan sudut rotor (δ) sangat berpengaruh pada kestabilan sudut rotor. Pada saat operasi manual maka daya mekanik generator sama dengan daya elektrik dari sistem. Namun pada saat gangguan maka terjadi perbedaan antara daya mekanik generator dan daya elektrik sistem. Perbedaan daya mekanik generator (P_m) dan daya elektrik sistem (P_e) saat sebelum gangguan, saat gangguan, dan setelah gangguan dapat terlihat pada ilustrasi berikut,



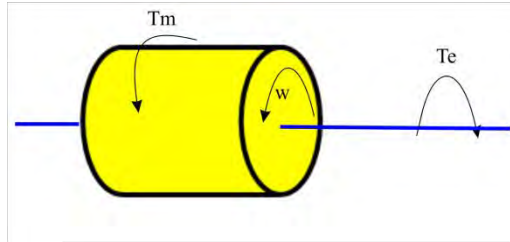
Gambar 2.2 Skema Perilaku Generator Ketika Terjadi Gangguan

Pada keadaan operasi normal maka daya elektrik sistem sesuai dengan daya mekanik dari generator [2]. Kemudian saat terjadi gangguan ada daya dari sistem yang hilang sehingga daya elektrik lebih sedikit dibandingkan dengan daya mekanik dari generator sehingga rotor mengalami percepatan. Kemudian pada saat terjadi setelah gangguan diputus maka daya output generator lebih dari pada daya mekanis turbin mengakibatkan perlambatan dari rotor generator. Apabila terdapat torsi lawan yang cukup setelah gangguan hilang untuk mengimbangi percepatan yang terjadi selama terjadinya gangguan, generator akan stabil setelah ayunan yang pertama dan kembali ke titik kerjanya. Bila kopel lawan tersebut tidak cukup besar, sudut rotor akan terus bertambah cepat samapai hilang sinkronisasi dengan sistem.

2.3. Persamaan Ayunan (*Swing Equation*)

Pada mesin sinkron maka pengaturan dilakukan berdasarkan prinsip dasar dinamika. Prinsip ini menyatakan bahwa momen putar percepatan (*accelerating torque*) merupakan hasil kali dari percepatan

sudutnya dan momen kelembaman (*moment of inertia*) rotor [5].
 Persamaan ayunan dapat diilustrasikan seperti gambar berikut,



Gambar 2.3 Mempresentasikan suatu rotor generator yang membandingkan arah perputaran serta momen putar Mekanis dan Elektrik

Pada keadaan *steady state* tidak ada perbedaan antara torsi mekanik dari generator dan torsi elektrik sehingga tidak ada percepatan atau,

$$\begin{aligned} T_m &= T_e \\ T_m - T_e &= 0 \end{aligned} \quad (2.3.1)$$

Namun, dalam keadaan saat terjadi gangguan maka ada perbedaan antara torsi mekanik dan elektrik sehingga muncul momen percepatan. Sehingga persamaan (2.3.1) menjadi,

$$\begin{aligned} T_m - T_e &= J a \\ T_m - T_e &= J \ddot{\delta} = T_a \end{aligned} \quad (2.3.2)$$

dimana

- T_m = torsi mekanik dari generator
- T_e = torsi elektrik
- (δ) = pergeseran sudut rotor
- J = momen kelembaman total dari massa rotor

Apabila persamaan (2.3.2) dikalikan kecepatan sudut konstan (ω_s) maka menjadi,

$$M \ddot{\delta} = P_m - P_e \quad (2.3.3)$$

Berdasarkan referensi [6] hubungan antara M (momentum sudut) dan H (konstanta inertia) adalah

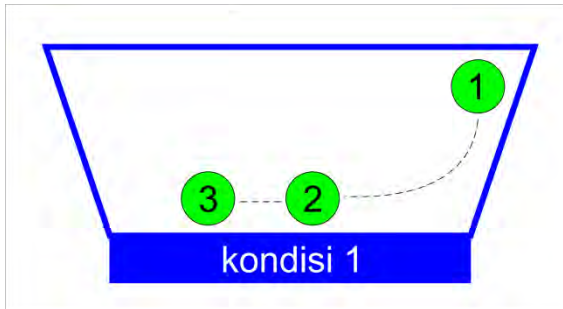
$$M = \frac{gH}{180f} \quad (2.3.4)$$

Dalam hal ini pada umumnya H (konstanta inertia) digunakan pada persamaan ayunan untuk kasus satuan dalam *torque* dengan satuan Nm. Sedangkan, M (momentum sudut) untuk kasus yang dinyatakan dalam Mega Watts. Oleh karena itu pada saat terjadi gangguan, harus segera dihilangkan agar tidak terjadi percepatan atau perlambatan agar tidak menyebabkan hilangnya sinkronisasi. *Time frame* pada analisa kestabilan transient pada umumnya 3-5 detik atau 10-20 detik untuk sistem yang besar dan kompleks.

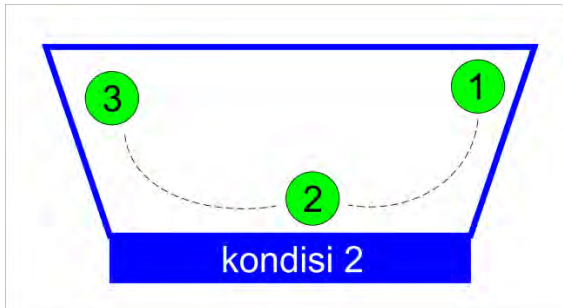
2.4. *Energy Function*

Kestabilan transien mempunyai dampak yang sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Dampak yang ditimbulkan dari ketidakstabilan transient sistem tenaga listrik ini sangat terlihat besar. Analisa yang sistem tenaga selama ini pada umumnya dilakukan setelah terjadinya kegagalan sistem mencapai keadaan stabil setelah terjadinya gangguan. Metode ini dapat dikatakan cukup handal hanya untuk beberapa sistem kelistrikan. Hal ini dikarenakan iterasi numerikal yang memakan waktu lama dalam iterasi dalam sistem.

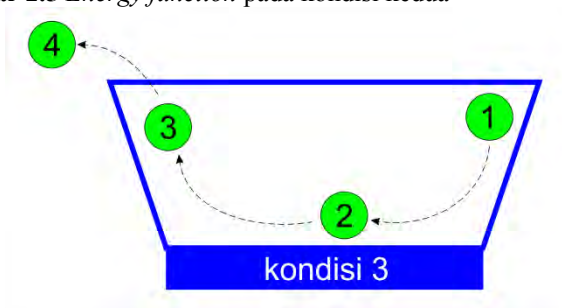
Pola perubahna energi sangatlah besar dalam waktu yang singkat sehingga diperlukan metode baru analisa kestabilan transient. Metode Lyapunov telah banyak dikembangkan untuk memodelkan matematis titik kestabilan. Pada referensi [6]-[7] telah dilakukan improvisasi dalam metode ini, yaitu dengan pada pemodelan matematika sistem tenaga listrik. Metode ini disebut sebagai *energy function*, di mana mentransformasikan Lyapunov kedalam bentuk energi. Pada metode ini sangat erat hubungan antara energi kinetik dan potensial generator, energi kinetik berhubungan dengan energi mekanik yang dihasilkan oleh putaran rotor generator dan energi potensial berhubungan dengan elemen jaringan pada sistem. *Energy function* dapat diilustrasikan seperti gambar berikut,



Gambar 2.4 *Energy function* pada kondisi pertama



Gambar 2.5 *Energy function* pada kondisi kedua



Gambar 2.6 *Energy function* pada kondisi kedua

Pada kondisi pertama, bola menggelinding pada mangkok kemudian berisolasi pada batas mangkok namun kemudian kembali masuk mangkok. Hal ini seperti sistem yang telah mengalami gangguan kemudian gangguan diputus dan sistem kembali pada keadaan normal.

Pada kondisi kedua, bola menggelinding pada mangkok kemudian berisolasi secara terus menerus pada pinggiran mangkok. Hal ini dapat diibaratkan seperti sistem yang tidak stabil setelah mengalami gangguan, generator mengalami isolasi yang cukup besar secara terus-menerus walaupun gangguan telah diputus. Pada kondisi tiga dapat dilihat setelah bola dilemparkan pada mangkok bola tersebut justru keluar dari mangkok. Hal ini menunjukkan sistem yang tidak stabil setelah gangguan diputus, generator menjadi lepas sinkronisasi.

2.5. Gangguan Hubung Singkat Tidak Simetri

Saat ini terjadi gangguan pada suatu sistem akan mengalir arus yang besar menuju ke titik gangguan. Arus gangguan tersebut memiliki nilai yang besar dari rating arus maksimum yang diijinkan, sehingga mengakibatkan rusaknya peralatan listrik, berkurangnya stabilitas daya, dan terhentinya kontinuitas daya [11]. Hal ini dapat mengakibatkan ketidakstabilan pada sistem tenaga listrik. Pada sistem tenaga listrik terdapat 2 jenis gangguan hubung singkat (*short circuit*), yaitu gangguan hubung singkat simetris (tiga fasa ke tanah) dan gangguan hubung singkat tidak simetris. Sebagian besar gangguan yang terjadi pada sistem tenaga listrik adalah gangguan tidak simetri. Gangguan tidak simetri ini terjadi sebagai akibat gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah, gangguan hubung singkat dua fasa, atau gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah.

Penguraian komponen tiga fasor tidak simetris dari tiga himpunan fasor simetris dilakukan dengan mengurangi banyaknya kuantitas yang diketahui yaitu dengan menyatakan masing-masing komponen V_b dan V_c sebagai hasil kali fungsi operator a dari komponen V_a . Hubungannya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$V_a = V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \quad (2.5.1)$$

$$V_b = a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \quad (2.5.2)$$

$$V_c = a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0} \quad (2.5.3)$$

dari persamaan (2.5.1), (2.5.2), dan (2.5.3) dapat dikombinasikan menjadi bentuk matrik sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.5.4)$$

apabila matrik (2.5.4) diinvers maka akan menjadi berikut

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \text{ diinvers menjadi } A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (2.5.5)$$

apabila dikembalikan ke dalam bentuk (2.5.4) akan menjadi,

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_a \\ V_a \end{bmatrix} \quad (2.5.6)$$

dari matrik (2.5.6) diuraikan kembali seperti pada bentuk persamaan (2.5.1) akan menjadi seperti berikut,

$$V_{a0} = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \quad (2.5.7)$$

$$V_{a1} = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (2.5.8)$$

$$V_{a2} = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (2.5.9)$$

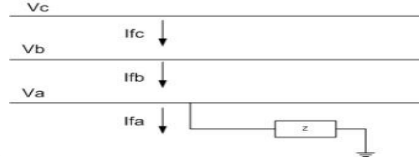
Karena setiap gangguan hubung singkat tidak simetri menyebabkan terjadinya aliran arus yang tidak seimbang ke dalam sistem, maka dibutuhkan metode komponen simetris dalam analisis untuk menentukan arus dan tegangan disemua titik yang terjadi gangguan. Tanpa memperhatikan jenis gangguan yang terjadi pada terminal generator, maka digunakan persamaan dalam bentuk matriks sebagai berikut

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_a \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.5.10)$$

Untuk setiap jenis gangguan yang terjadi dapat diselesaikan dengan menurunkan I_{a1} dengan E_a , Z_0 , Z_1 , dan Z_2 sebagai suku-sukunya.

2.5.1 Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Persamaan yang akan dikembangkan untuk jenis gangguan gangguan satu fasa ke tanah adalah apabila gangguan terjadi pada fasa *a*, tetapi hal ini tidak perlu dikhawatirkan karena fasa tersebut telah dinamakan dengan sembarang dan penamaan fasa *a* pada sistem tiga fasa tergantung dari *user*.



Gambar 2.7 Hubungan dari urutan fasa pada gangguan satu fasa ke tanah dengan impedansi

Hubung singkat ini melibatkan impedansi urutan nol, dan besarnya arus hubung singkat ini tergantung sistem pertanahan yang digunakan [5]. Besarnya arus hubung singkat 1 fasa ($I_{sc\ 1\phi}$) dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$I_{sc\ 1\phi} = \frac{3 \times V_{LN}}{X_1 + X_2 + X_0 + 3xZg} \quad (2.5.1.1)$$

Apabila sistem menggunakan pertanahan solid maka $Zg = 0$ dan $X_1 = X_2 = X_0$, sehingga persamaan menjadi

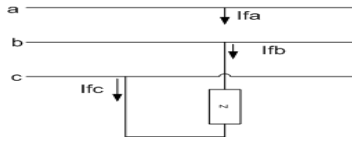
$$I_{sc\ 1\phi} = \frac{3 \times V_{LN}}{3 \times X_1} = \frac{V_{LN}}{X_1} = I_{sc\ 3\phi} \quad (2.5.1.2)$$

2.5.2 Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa

Hubung singkat 2 fasa yaitu hubung singkat yang terjadi antara 2 fasa tanpa terhubung ke tanah dan hubung singkat 2 fasa ke tanah. Besarnya arus hubung singkat 2 fasa (I_{sc2}) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$I_{sc\ 2\phi} = \frac{V_{LL}}{X_1 + X_2} \quad (2.5.2.1)$$

Dengan V_{LL} adalah tegangan nominal line to line, dimana sama dengan $\sqrt{3} V_{LN}$ dan X_2 adalah reaktansi urutan negatif.

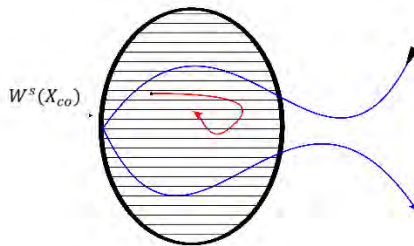


Gambar 2.8 Hubungan dari urutan fasa pada gangguan antar 2 fasa dengan impedansi

2.6 Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP)

Terdapat beberapa metode untuk menentukan energi kritis dalam analisis kestabilan transien salah satunya adalah menggunakan metode *energy function*. Dengan menggunakan *energy function* kita dapat menentukan energi dari setiap generator pada sistem dan *Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP)* dari setiap titik gangguan, acuan energi ini juga sebagai landasan utama pemilihan *critical generator*.

Mengacu pada referensi [6], *Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP)* merupakan menyempurnaan dari beberapa metode sebelumnya. *Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP)* merupakan suatu metode untuk menentukan energi kritis dengan batas kesalahan yang cukup relevan pada sistem. Metode ini cukup akurat menentukan kestabilan sistem tenaga listrik sebab *Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP)* secara mendasar sebagai batas dasar pengendali batas kestabilan sistem tenaga listrik. Apabila lintasan gangguan (*fault trajectory*) melewati *Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP)* pada batas kestabilan, maka sistem tidak stabil. Sebaliknya, jika lintasan gangguan (*fault trajectory*) melewati *Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP)* pada batas kestabilan, maka sistem akan stabil.

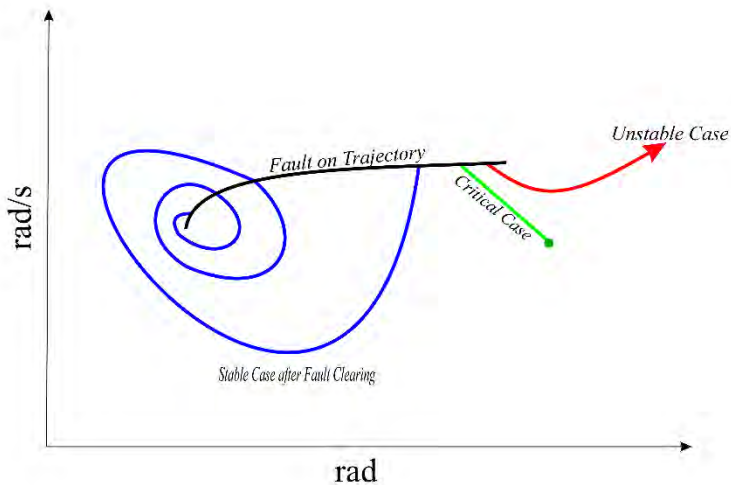


Gambar 2.9 Metode *Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP)*.

Dari ilustrasi di atas kita dapat mengetahui bahwa *Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP)* merupakan pendekatan pada batas kestabilan $W^s(X_{co})$ yang dituju oleh lintasan gangguan (*fault trajectory*). Dari *BCU Shadowing* mendapatkan nilai *Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP)* dan *energy function* dari masing-masing generator untuk digunakan sebagai generator kritis (*critical generator*) untuk penentuan *critical clearing time (cct)*.

2.7 Lintasan Kritis (*Critical Trajectory*)

Lintasan kritis atau *critical trajectory* didefinisikan sebagai lintasan yang dimulai dari titik pada *fault-on trajectory* (lintasan saat sistem sedang mengalami *fault*) dan mencapai titik kritis (*critical point*) yang memenuhi kondisi putus sinkron. Selain hal itu kondisi lain dimodifikasi untuk metode ini yaitu saat *critical point* mencapai CUEP (*Controlling Unstable Equilibrium Point*) untuk multi mesin [6]. Dan dari lintasan kritis ini dapat diamati kapan sistem masih stabil dan tidak dengan mengamati nilai CCT (*Critical Clearing Time*) yang didapatkan dengan cepat, karena apabila menggunakan metode konvensional yaitu TDS (*Time Domain Simulation*) biasanya tidak akurat dan memakan waktu lama dalam perhitungannya.

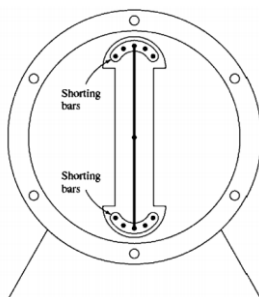


Gambar 2.10 Ilustrasi gambar *Critical trajectory*

Gambar 2.11 menunjukkan beberapa *trajectory* atau lintasan dari sebuah mesin sinkron atau generator sinkron yang terhubung dengan bus *infinite*. Lintasan berwarna hitam menggambarkan *fault on trajectory* yaitu lintasan saat gangguan sedang terjadi. Lintasan berwarna biru menggambarkan sistem dapat kembali ke keadaan stabil setelah gangguan terjadi. Lintasan berwarna merah menggambarkan sistem tidak dapat kembali ke keadaan stabil setelah gangguan terjadi. Sedangkan lintasan berwarna hijau adalah lintasan kritis (*critical trajectory*) suatu sistem tenaga listrik dan merupakan batas antara keadaan stabil dan tidak stabil. Lalu lintasan kritis ini akan mencapai ke x^u atau UEP (*Unstable Equilibrium Point*) yang merupakan titik kritis dari sistem. Pada penelitian ini *exit point* dari sistem ini berdasarkan nilai CUEP (*Controlling Unstable Equilibrium Point*) yang didapatkan dari program *BCU Shadowing*.

2.8. Kumpran Peredam (*Damper Winding*)

Kumpran peredam (*damper winding*) merupakan salah satu alat yang dapat digunakan sebagai peredam osilasi yang terjadi akibat perbedaan daya elektris dan mekanis [9]. Kumpran peredam ini berupa batangan plat besi yang diletakkan pada slot-slot dinding-dinding kutub rotor dari motor sinkron yang kemudian di *short* kan di setiap ujungnya oleh *shorting ring* yang besar. Berikut adalah ilustrasi gambar dari *damper winding*.



Gambar 2.11 Penggambaran Sederhana Rotor Dua Kutub Menonjol dengan *Damper Winding*

Pada gambar di atas dapat kita lihat kedua ujung dari kumpran peredam (*damper winding*) di *short* kan dengan dihubungkan dengan kabel.

BAB III PEMODELAN SISTEM

Critical Clearing Time (CCT) adalah parameter akhir yang dicapai dalam penelitian ini. Pada penelitian ini menggunakan metode [8] yaitu, *critical trajectory* atau lintasan kritis. Dalam mendapatkan nilai CCT dilakukan beberapa langkah untuk memenuhi beberapa parameter awal. Beberapa langkah ini menjadi alur dalam perhitungan *Critical Clearing Time (CCT)*.

3.1 Aliran Daya (*Power Flow*)

Aliran daya merupakan langkah awal dalam menentukan parameter-parameter yang kemudian dilakukan iterasi selanjutnya. Pada proses ini dilakukan pembacaan data-data yang diperlukan, termasuk bus-bus yang terhubung, baik yang terhubung dengan generator dan beban beserta admitansi saluran antar bus.

Admitansi antar bus sebagai *input* dari matrik Y_{bus} yang selanjutnya dilakukan iterasi perhitungan untuk mengetahui aliran daya pada setiap bus pada sistem [5]. Secara umum, persamaan aliran daya adalah sebagai berikut

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & & Y_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ Y_{31} & Y_{32} & \dots & Y_{3n} \end{bmatrix} \quad (3.1.1)$$

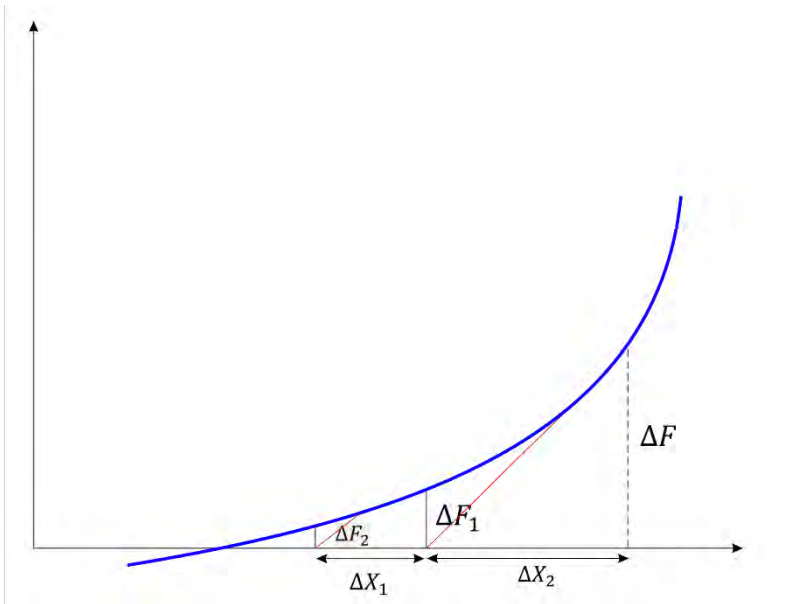
$$\begin{aligned} P_i - jQ_i &= V_i^* I_i \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n V_j Y_{ij} \end{aligned} \quad (3.1.2)$$

dimana :

- P_i : daya aktif terbangkit pada bus ke- i
- Q_i : daya reaktif terbangkit pada bus ke- i
- Y_{ij} : admitansi antara bus i dan bus j
- V_i : magnitude tegangan pada bus ke- i
- I_i : magnitude tegangan pada bus ke- j

3.1.1 *Newton Raphson*

Metode *Newton Raphson* merupakan metode yang dikembangkan dari Deret Taylor mendapatkan turunan persamaan matematika dalam penentuan matrik Jacobian sebagai dasar perhitungan iterasinya. Secara ilustrasi, metode *Newton Raphson* dapat digambarkan seperti gambar 3.1. di bawah ini



Gambar 3.1. Ilustrasi Metode *Newton Raphson*

Untuk persamaan Deret Taylor dapat ditulis seperti persamaan di bawah ini:

$$f(x) = f(x_o) + \frac{1}{1!} \frac{df(x_o)}{dx} (x - x_o) + \frac{1}{2!} \frac{d^2 f(x_o)}{dx^2} (x - x_o)^2 + \dots + \frac{1}{n!} \frac{d^n f(x_o)}{dx^n} (x - x_o)^n \quad (3.1.1.1)$$

Nilai admitansi bus i terhadap dirinya sendiri :

$$Y_{ii} = |Y_{ii}| e^{j\theta_{ii}} = |Y_{ii}| \angle \theta_{ii} \\ = |Y_{ii}| (\cos \theta_{ii} + j \sin \theta_{ii}) \quad (3.1.1.2)$$

rumus $G_{ii} = |Y_{ii}| \cos \theta_{ii}$ adalah konduktansi dan $B_{ii} = |Y_{ii}| \sin \theta_{ii}$ adalah susceptansi, demikian pula antara bus i dan bus j , dapat ditulis:

$$Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (3.1.1.3)$$

Dalam perhitungan daya aktif (P),

$$P = V I \cos \theta \quad (3.1.1.4)$$

$$\text{dimana } I = V \cdot Y \quad (3.1.1.5)$$

dengan mensubstitusi persamaan 3.1.1.4 dengan 3.1.1.5 maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut

$$P_1 = V^2 Y \cos(\delta_1 - \delta_2 - \theta) \quad (3.1.1.6)$$

jika persamaan (3.1.1.6) diaplikasikan pada sistem banyak mesin / multimesin, maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$P_1 = Y_{11} V_1 V_1 \cos(\theta_{11} + \delta_1 - \delta_1) + Y_{12} V_1 V_2 \cos(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \cos(\theta_{1n} + \delta_1 - \delta_n) \quad (3.1.1.7)$$

dengan mensubstitusikan (3.1.1.3) ke dalam persamaan (3.1.1.7) maka akan mendapatkan persamaan sebagai berikut

$$P_1 = G_{11} V_1^2 + Y_{12} V_1 V_2 \cos(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_2) + \dots + Y_{1n} V_1 V_n \cos(\theta_{1n} + \delta_1 - \delta_n) \quad (3.1.1.8)$$

sehingga dapat ditulis menjadi,

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + \sum_{i,i \neq j}^n \sum_j^n Y_{ij} V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (3.1.1.9)$$

pada persamaan Q juga dapat ditulis

$$Q = V I \sin \theta \quad (3.1.1.10)$$

sehingga didapatkan,

$$Q_1 = V^2 Y \sin(\delta_1 - \delta_2 - \theta) \quad (3.1.1.11)$$

jika persamaan (3.1.1.11) diaplikasikan pada sistem banyak mesin / multimesin, maka akan didapatkan persamaan sebagai berikut :

$$Q_1 = Y_{11}V_1V_1 \sin(\theta_{11} + \delta_1 - \delta_1) + Y_{12}V_1V_2 \sin(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_3) + \dots + Y_{1n}V_1V_n \sin(\theta_{1n} + \delta_1 - \delta_n) \quad (3.1.1.12)$$

dengan mensubstitusikan (3.1.1.3) ke dalam persamaan (3.1.1.12) maka akan mendapatkan persamaan sebagai berikut

$$Q_1 = B_{11}V_1^2 + Y_{12}V_1V_2 \sin(\theta_{12} + \delta_1 - \delta_3) + \dots + Y_{1n}V_1V_n \sin(\theta_{1n} + \delta_1 - \delta_n) \quad (3.1.1.13)$$

sehingga dapat ditulis menjadi,

$$P_i = V_i^2 B_{ii} + \sum_{i,i \neq j}^n \sum_j^n Y_{ij} V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad (3.1.1.14)$$

dimana :

P_i : daya aktif terbangkit pada bus ke- i

Q_i : daya reaktif terbangkit pada bus ke- i

Y_{ij}, θ_{ij} : magnitude dan sudut fasa elemen matrik admitansi Y

V_i, δ_i : magnitude tegangan dan sudut fasa pada bus ke- i

V_j, δ_j : magnitude tegangan dan sudut fasa pada bus ke- j

3.1.2 Matriks Jacobian

Setelah mendapatkan tegangan masuk dan keluar pada tiap bus, maka selanjutnya adalah menentukan komponen matrik Jacobian. Matrik Jacobian sendiri terdiri dari

$$Jacobian\ matrik = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \quad (3.1.2.1)$$

H adalah perubahan arah daya aktif terhadap sudut :

$$H_{ij} = \sum_i^n \sum_j^n \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_i \quad (3.1.2.2)$$

N adalah perubahan arah daya aktif terhadap tegangan :

$$N_{ij} = \sum_i^n \sum_j^n |V_i| \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \quad (3.1.2.3)$$

J adalah perubahan arah daya reaktif terhadap sudut :

$$J_{ij} = \sum_i^n \sum_j^n \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_i \quad (3.1.2.4)$$

L adalah perubahan arah daya aktif terhadap tegangan :

$$L_{ij} = \sum_i^n \sum_j^n |V_i| \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \quad (3.1.2.5)$$

sehingga, untuk mencari aliran daya setiap bus dapat dituliskan persamaan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \frac{\Delta |V|}{|V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3.1.2.6)$$

Selanjutnya dari perkalian matrik Jacobian diatas, akan didapat nilai dari $\Delta \theta_i$ dan $\Delta |V_i|$ yang digunakan sebagai *update* sudut dan magnitudo tegangan tiap bus.

$$\theta_i^{(k+1)} = \theta_i^{(k)} + \Delta \theta_i \quad (3.1.2.7)$$

$$|V_i|^{(k+1)} = |V_i|^{(k)} + \Delta |V_i| \quad (3.1.2.8)$$

dimana :

$(k+1)$: jumlah iterasi newton raphson

$\Delta \theta_i$: Perubuaaha sudut tegangan pada bus ke- i

$\Delta |V_i|$: Perubahan magnitudo tegangan pada bus ke- i

Kemudian selisih daya aktif dan reaktif tiap bus yang baru dengan yang lama dibandingkan dengan ketelitian yang telah ditentukan. Apabila nilai ketelitian telah tercapai, maka proses iterasi selesai, namun sebaliknya,

jika nilai ketelitian belum tercapai maka iterasi dilanjutkan sampai mencapai iterasi maksimal. Pada penelitian ini diharapkan batas ketelitian dari system sebesar 0.00001

3.2 Reduksi Matriks Jaringan

Ukuran dari sistem yang kompleks menyebabkan analisa transient menjadi lebih rumit. Mengacu pada referensi [10] untuk mempermudah dalam analisa kestabilan transient maka direduksi dengan menghilangkan bus beban dari matrik admintansi, bus antar beban dieliminasi karena tidak ada arus yang mengalir pada bus tersebut. Tujuan dari reduksi ini adalah untuk menyederhanakan sistem sehingga menjadi lebih mudah dan cepat saat melakukan perhitungan pada *step* setelahnya. Dalam hal ini yang digunakan adalah reduksi Kron. Untuk merepresentasikan matrik admitansi dari sistem dapat dilihat pada persamaan dibawah ini:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (3.2.1)$$

Persamaan (3.2.1) dimisalkan I_0 adalah bus yang tidak dialiri arus, dimana $I_0 = 0$. Sehingga persamaan (3.2.1) dapat direduksi menjadi persamaan (3.2.2) ,

$$\begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{22}^{(new)} & Y_{23}^{(new)} & Y_{24}^{(new)} \\ Y_{32}^{(new)} & Y_{33}^{(new)} & Y_{34}^{(new)} \\ Y_{42}^{(new)} & Y_{43}^{(new)} & Y_{44}^{(new)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} \quad (3.2.2)$$

$Y^{(new)}$ pada persamaan (3.2.2) dapat dari persamaan (3.2.3) sebagai berikut,

$$Y_{ij}^{new} = Y_{ij}^{old} - \frac{Y_{ik} - Y_{kl}}{Y_{kk}} \quad (3.2.3)$$

Dengan ukuran matrik yang lebih sederhana dapat mempermudah dalam analisa kestabilan transient. Dalam hal ini hanya terdapat bus yang termasuk dalam batas kestabilan yang digunakan dalam proses perhitungan selanjutnya.

3.3 *Energy Function* untuk Menentukan Energi Setiap Generator

Mengacu pada referensi [6] *Energi function* merupakan gabungan dari perubahan beberapa energi dari generator, diantaranya adalah energi kinetik rotor, energi potensial rotor, energi magnetik yang tersimpan, serta perubahan energi disipasi. Secara matematis *energi function* dapat dituliskan seperti pada persamaan dibawah ini:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \hat{\omega}_i^2 - \sum_{i=1}^n P_i(\theta_i - \theta_i^s) - \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \left[C_{ij}(\cos \theta_{ij} - \cos \theta_{ij}^s) - \int_{\theta_i^s + \theta_j^s}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \right] \quad (3.3.1)$$

dari persamaan diatas didapat empat persamaan perubahan energi, antara lain:

- a) Perubahan kinetik rotor

$$V_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n M_i \hat{\omega}_i^2 \quad (3.3.2)$$

- b) Perubahan energi potensial rotor

$$V_p = \sum_{i=1}^n P_i(\theta_i - \theta_i^s) \quad (3.3.3)$$

- c) Perubahan energi magnetik yang tersimpan

$$V_m = -\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n E_i E_j B_{ij} (\cos(\theta_i - \theta_j) - \cos(\theta_i^s - \theta_j^s)) \quad (3.3.4)$$

- d) Perubahan energi disipasi

$$\int_{\theta_i^s + \theta_j^s}^{\theta_i + \theta_j} D_{ij} \cos \theta_{ij} d(\theta_i + \theta_j) \quad (3.3.5)$$

dalam hal ini energi disipasi dapat diabaikan karena tidak dapat dihitung. Sehingga pada penelitian ini nilai dari energi disipasi dapat diabaikan.

3.4 Metode Runge Kutta orde-4 untuk memodelkan *pre-fault* dan *on-fault* sistem

Sesuai literatur [8], metode Runge-Kutta dapat digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial pada umumnya.

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (3.4.1)$$

$$k1 = f(x) \quad (3.4.2)$$

$$k2 = f\left(x + \frac{1}{2}k1\right) \quad (3.4.3)$$

$$k3 = f\left(x + \frac{1}{2}k2\right) \quad (3.4.4)$$

$$k4 = f(x + k3) \quad (3.4.5)$$

$$x = x + \frac{1}{6}(k1 + 2k2 + 2k3 + k4) \quad (3.4.6)$$

dimana, $f(x)$ merupakan fungsi dari *energi function* pada saat gangguan yang dapat dicari dari persamaan dibawah ini,

$$P_{coi} = \sum_{i=1}^n P_{mi} - P_{ei} \quad (3.4.7)$$

$$\hat{\omega} = \frac{P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_1}{M_t} P_{coi}}{M} \quad (3.4.8)$$

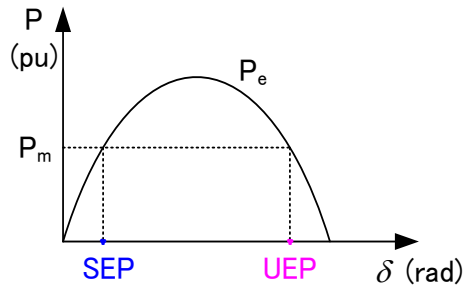
$$\delta = \omega_t - \omega_0 \quad (3.4.9)$$

Dengan mengetahui omega (ω) dan delta (δ) kita dapat memodelkan saat sebelum terjadi gangguan sampai dengan saat terjadi gangguan. Titik-titik dari *pre-fault* sampai dengan *on-fault* dapat kita modelkan dengan permisalan pada sistem dengan kurva waktu (t) dan omega ω . Sehingga keadaan dari sistem dapat digambarkan melalui metode *Range Kutta* orde-4.

Setelah terjadi gangguan sistem akan stabil apabila dapat dipotong sebelum titik kritisnya dan akan tidak stabil apabila dipotong setelah titik kritisnya. Nilai dari SEP (*Stable Equilibrium Point*) dan UEP (*Unstable Equilibrium Point*) dimodelkan pada bab berikutnya.

3.5. Pemodelan *SEP (Stable Equilibrium Point)* dan *UEP (Unstable Equilibrium Point)* untuk Sistem 2 Generator

Setelah penjelasan awal mengenai perilaku generator ketika terjadi gangguan di bab sebelumnya, akan dibahas bagaimana hubungan antara UEP (*Unstable Equilibrium Point*) untuk 2 mesin / generator yang terhubung pada sistem.



Gambar 3.2. Permodelan Generator Saat Terjadi Gangguan

berdasarkan referensi [2] maka power faktor dari *equilibrium condition* adalah

$$\sin \delta_e = \frac{P_m X}{EV_b} \quad (3.5.1)$$

pada keadaan stabil maka $P_m = P_e$, sehingga persamaan (3.5.1) dapat ditulis menjadi,

$$P_m = P_e = \frac{EV_b}{X} \sin \delta \quad (3.5.2)$$

berdasarkan persamaan (2.3.5) *inertia constant* dari sebuah mesin dapat dijabarkan menjadi persamaan di bawah ini,

$$\dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} (P_{mi} - P_{ei}(\delta) - D_1(\omega - \omega_s)) \quad (3.5.3)$$

$$\delta_1 = \dot{\omega} - \omega_s \quad (3.5.4)$$

free motion of dynamic system didefinisikan sebagai berikut

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x \quad (3.5.5)$$

Untuk mendapatkan nilai *eigenvalue* dan *eigenvector* maka mensubsitusikan persamaan (3.5.3) kedalam persamaan (3.5.5) untuk mendapatkan matrik A. Berdasarkan referensi [2] P_m adalah daya dari generator yang nilai sudah ditetapkan maka di anggap konstan sedangkan P_e berubah – ubah karena gangguan pada sistem sehingga persamaan (3.5.2) menjadi berikut:

$$P_{ei}(\delta) = E_i^2 G_{ii} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n E_i E_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \quad (3.5.6)$$

sehingga apabila persamaan (3.5.6) apabila di subsitusikan kedalam (3.5.5) adalah sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_1 \\ \Delta \dot{\delta}_1 \\ \Delta \dot{\omega}_2 \\ \Delta \dot{\delta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{D_1}{M_1} & -\frac{E_1 E_2}{M} (-G_{12} \sin \delta_{12} + B \cos \delta_{12}) & 0 & \frac{E_1 E_2}{M} (G_{12} \sin \delta_{12} - B \cos \delta_{12}) \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{E_2 E_1}{M} (G_{21} \sin \delta_{21} - B \cos \delta_{21}) & -\frac{D_2}{M_2} & -\frac{E_2 E_1}{M} (-G_{21} \sin \delta_{21} + B \cos \delta_{21}) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \omega_1 \\ \Delta \delta_1 \\ \Delta \omega_2 \\ \Delta \delta_2 \end{bmatrix} \quad (3.5.7)$$

sehingga persamaan matrik di atas menjadi,

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\omega}_1 \\ \Delta \dot{\delta}_1 \\ \Delta \dot{\omega}_2 \\ \Delta \dot{\delta}_2 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \Delta \omega_1 \\ \Delta \delta_1 \\ \Delta \omega_2 \\ \Delta \delta_2 \end{bmatrix} \quad (3.5.8)$$

dengan mensubsitusikan matrik A kedalam matrik di bawah ini untuk mendapatkan *eigenvalues*

$$|A - \lambda I| = 0 \quad (3.5.8)$$

dimana sistem akan stabil apabila nilai *real* dari λ adalah negatif dan akan tidak stabil apabila bernilai positif. Untuk mendapatkan *eigenvector* maka matrik A disubsitusikan pada matrik di bawah ini,

$$|A - \lambda I|v = 0 \quad (3.5.9)$$

dengan mengetahui eigenvector dari sebuah mesin, selanjutnya dapat disimulasikan *unstable equilibrium point* dari mesin sinkron.

3.6 Metode *Critical Trajectory* (Lintasan Kritis)

Pada sub-bab ini dibahas bagaimana mendapatkan lintasan kritis (*critical trajectory*) yang digunakan sebagai dasar penentuan *CCT* (*Critical Clearing Time*) pada penelitian ini. Seperti penjelasan sebelumnya bahwa keadaan sebelum gangguan dan saat gangguan telah dimodelkan oleh *Runge Kutta orde 4*. Setelah terjadi gangguan maka sistem akan kembali pada keadaan stabil apabila diputus sebelum waktu kritisnya dan akan tidak stabil apabila gangguan diputus setelah waktu kritisnya.

3.6.1 Modifikasi Metode *Trapezoidal*

Pada sub-bab ini, dibahas mengenai modifikasi dari metode Trapezoidal. Metode Trapezoidal merupakan dasar untuk menyelesaikan metode *critical trajectory* yang digunakan pada tugas akhir ini. Berikut adalah persamaan Trapezoidal secara konvensional:

$$x^{k+1} - x^k = \frac{1}{2}(\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k)(t^{k+1} - t^k) \quad (3.6.1.1)$$

dimana

$$\dot{x}^k = f(x^k)$$

Lambang k dimaksudkan jumlah iterasi terhadap waktu.

Metode *critical trajectory* ini dicapai oleh titik kritis menggunakan metode secara iterasi telah dibahas pada referensi [8]. Tetapi pada beberapa kasus khusus, titik kritis cocok dengan UEP dan trajektori dapat mencapai UEP pada waktu tak hingga (*infinite time*) atau data yang digunakan tidak konvergen sehingga hanya pendekatan. Gambar 3.11 mengilustrasikan *critical trajectory*, dimana dua titik dalam kondisi batas, x^0 dan x^u , merepresentasikan titik awal yaitu pada saat CCT dan titik kritisnya (*end point condition*). Kesulitan yang dialami untuk mendapatkan *critical trajectory* adalah waktu tak hingga diperlukan untuk mencapai UEP. Untuk menghindari permasalahan tersebut pada analisa kestabilan ini, modifikasi dari persamaan Trapezoidal ditemukan. Pertama-tama, jarak antara kedua titik pada persamaan (3.6.1.1) didefinisikan dengan:

$$\varepsilon = |x^{k+1} - x^k| = \frac{1}{2}|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|(t^{k+1} - t^k) \quad (3.6.1.2)$$

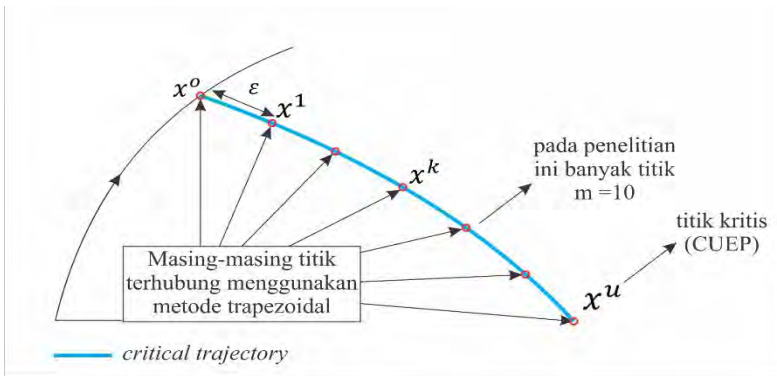
Setelah itu, waktu t pada persamaan (3.6.1.2) dapat dibawa ke domain jarak menjadi:

$$t^{k+1} - t^k = \frac{2}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon \quad (3.6.1.3)$$

Lalu persamaan (3.6.1.3) disubstitusikan pada (3.6.1.1) menjadi:

$$x^{k+1} - x^k - \frac{\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k}{|\dot{x}^{k+1} + \dot{x}^k|} \varepsilon = 0 \quad (3.6.1.4)$$

Dengan persamaan (3.7.1.4), teknik integrasi numerik dalam domain waktu ditransformasi menjadi domain jarak. Dengan proses transformasi ini lebih memungkinkan untuk merepresentasikan *critical trajectory* dengan waktu berhingga dengan jarak yang sama sesuai pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Konsep modifikasi metode Trapezoidal

3.6.2 Kondisi Batas (*Boundary Conditions*)

Berdasarkan Gambar 3.4, kondisi batas artinya kondisi di titik awal atau “*initial point condition*”, x^0 , dan kondisi di titik akhir atau “*end point condition*”, x^u . Kedua kondisi tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. *Initial point condition*

Pada awalnya, sistem beroperasi dalam kondisi stabil, dilambangkan dengan x_{pre} , ketika gangguan terjadi saat $t = 0$. Lalu,

sistem sistem diatur oleh kestabilan dinamis *fault-on* saat sistem sedang mengalami gangguan $[0, \tau]$ seperti berikut:

$$\dot{x} = f_F(x), 0 \leq t \leq \tau, x(0) = x_{pre} \quad (3.6.2.1)$$

dimana

$$x \in R^N, \quad t \in R, \quad f_F: R^N \rightarrow R^N$$

Kurva solusi dari persamaan (3.7.2.1) dinamakan dengan *fault-on trajectory*, dan dirumuskan dengan:

$$x(t) = X_F(t; x_{pre}), 0 \leq t \leq \tau \quad (3.6.2.2)$$

dimana

$$X_F(t; x_{pre}): R \rightarrow R^N$$

Gangguan dapat dihilangkan pada waktu τ . Dengan catatan bahwa titik awal x^0 adalah titik pada saat *fault-on trajectory* pada waktu τ . Maka persamaan (3.7.2.1) dan (3.7.2.2) dapat disederhanakan menjadi

$$x^0 = X_F(\tau; x_{pre}) \quad (3.6.2.3)$$

2. *End point condition*

Untuk keadaan satu mesin terhubung ke bus *infinite*, lintasan kritis (*critical trajectory*) dapat mencapai UEP yang terletak pada saat sistem dalam keadaan *post-fault* dan direpresentasikan dengan x^u , hal itu menunjukkan bahwa kondisi berikut berlaku pada titik akhir, $m + 1$ yang memenuhi persamaan:

$$\theta_{cg}^{m+1} = \theta_{cg}^u, \quad \tilde{\omega}_{cg}^{m+1} = \tilde{\omega}_{cg}^u \quad (3.6.2.4)$$

$$0 = f(x^u), \text{ dengan } x^u = [\theta^u, \tilde{\omega}^u] \quad (3.6.2.5)$$

Pada *critical trajectory* tidak dapat mencapai UEP pada sistem multi mesin, telah dilakukan pemeriksaan lengkap secara berkala untuk mengatasi permasalahan tersebut. Dan dari pemeriksaan lengkap pada sistem multi mesin tersebut dapat disimpulkan bahwa, meskipun semua elemen x tidak mencapai x^u , ada beberapa pasangan elemen x yang tetap dapat mencapai kecocokan dengan elemen x^u .

Variabel x^u adalah CUEP (*Controlling Unstable Equilibrium Point*). Nilai CUEP ini, x^u , dijabarkan lebih lanjut pada literature lain seperti metode BCU (*Boundary Controlling UEP*) *Shadowing*.

3.6.3 Pemilihan *Critical Generator*

Pemilihan generator yang dijadikan sebagai generator kritis berperan penting pada metode *critical trajectory*. Setelah dilakukan berbagai pemeriksaan, ditemukan bahwa nilai energy potensial dari setiap generator dapat digunakan sebagai indeks untuk pemilihan *critical generator*. Berdasarkan penelitian sebelumnya [4], energy dari generator kritis ini yang dapat mencapai *critical point*. Energi potensial pada persamaan *energy function* yang digunakan adalah:

$$Ep = \sum_i Ep_i \quad (3.6.3.1)$$

Dimana

$$Ep_i = [P_{mi} - (E_i)^2 G_{ii}][\theta_i - \theta_i^s] \quad (3.6.3.2)$$

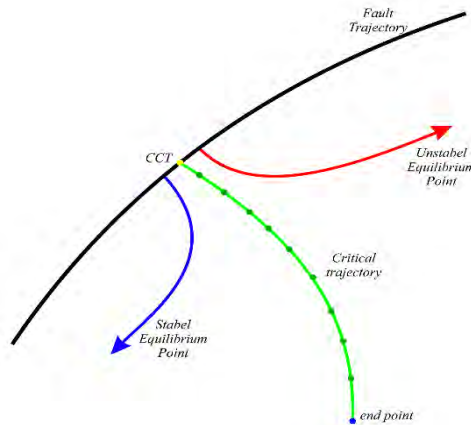
Variabel E_i adalah tegangan konstan yang terletak di belakang sumbu reaktansi transien dari generator. Sedangkan G_{ii} adalah nilai konduktansi penggerak dari generator. Huruf s merepresentasikan *Stable Equilibrium Point* (SEP), yaitu kondisi saat sistem dalam keadaan stabil. Dan Ep_i digunakan sebagai indeks untuk memilih CG.

Sehingga berdasarkan persamaan (3.6.3.1) dan (3.6.3.2), dapat disimpulkan bahwa generator dengan nilai energi potensial Ep terbesar dipilih menjadi generator kritis. Kedua persamaan diatas bekerja akurat untuk menentukan generator kritis dan telah dibuktikan dengan perhitungan manual oleh literatur [2]. Berdasarkan penelitian sebelumnya maka hanya nilai *Critical Generator* yang dapat mendekati nilai *end point* yang dapat dicapai.

Setelah generator kritis dipilih, dilakukan *weighting matrix* untuk setiap energi sebesar 9000 dan pembebanan terbesar pada generator kritis. Konsep dari *weighting matrix* adalah memberikan nilai yang sangat besar untuk generator yang ditetapkan sebagai CG, dan memberikan nilai yang sangat kecil untuk generator lainnya untuk memberikan keadaan UEP dimana elemen yang dapat mencapainya adalah $x^{m+1} = x^u$.

3.7 Menentukan Nilai CCT (Critical Clearing Time)

Pada sub bab 3.4. dan 3.6. dijelaskan bagaimana mendapatkan lintasan gangguan dan lintasan kritis dari system saat terjadi gangguan hubung singkat tidak seimbang . CCT (Critical Clearing Time) adalah titik pada awal lintasan kritis (*critical trajectory*) pada lintasan gangguan (*on fault trajectory*). Ilustrasi dari penjelasan di atas dapat dilihat pada gambar 3.5.



Gambar 3.4 Konsep CCT (Critical Clearing Time)

Dalam hal ini dapat diketahui bahwa sistem kembali stabil apabila gangguan diputus sebelum mencapai CCT dan apabila diputus setelah itu maka sistem menjadi tidak stabil. Akurasi dari lintasan kritis dapat ditentukan oleh m dan besar nilai. Kondisi batas akhir (*end point condition*) pada metode ini merupakan tambahan jika dibandingkan dengan metode konvensional *numerical integration*, yaitu metode yang digunakan sebagai formulasi nilai awal pada metode ini. Dalam metode konvensional, $error \mu^k$ diakumulasi seiring bertambahnya k sehingga titik akhir (x^u) memiliki kesalahan yang cukup besar. Tapi dalam metode ini, sesuai persamaan yang dihasilkan untuk titik akhir, menyelesaikan persamaan berlebih di setiap titik dengan minimisasi sehingga $error \mu^k$ tersebar di setiap titik dengan merata, dan titik akhir memiliki kesalahan yang kecil.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV

SIMULASI DAN ANALISA DATA

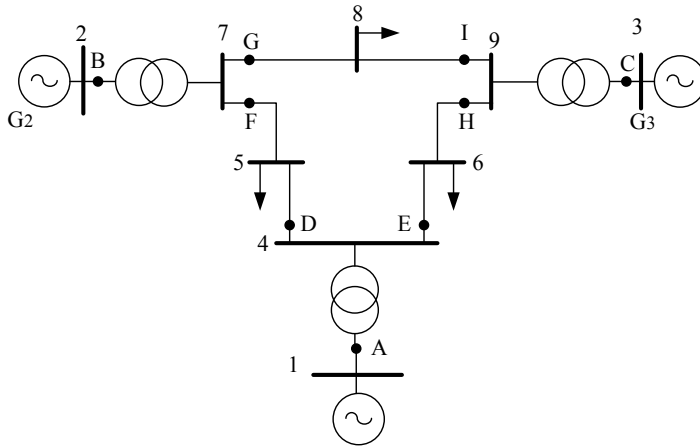
Pada bab ini, akan dilakukan simulasi pada sistem dengan multi mesin/multi generator. Sistem yang digunakan adalah Fouad Anderson 3-generator 9-bus dan sistem IEEE 7-generator 57-bus. Setiap saluran transmisi terdiri dari sirkuit *double circuit*, kemudian dengan mempertimbangkan gangguan hubung singkat tidak seimbang. Setelah beberapa saat, gangguan diputus dengan membuka sirkuit yang terkena gangguan.

Kelebihan dari metode yang diusulkan adalah memberikan nilai CCT dengan lebih cepat dan tepat dibandingkan metode konvensional TDS. Oleh karena itu spesifikasi dari perangkat yang digunakan untuk mensimulasikan metode *critical trajectory* sangat berpengaruh pada kecepatan proses iterasinya, mengingat metode yang diusulkan terdiri dari beberapa metode. Berikut spesifikasi dari perangkat yang digunakan untuk menjalankan simulasi di Matlab:

- | | |
|-------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1. <i>System Manufacturer</i> | : ASUSTeK Computer Inc. |
| 2. <i>System Model</i> | : K45VD |
| 3. BIOS | : BIOS Date: 08/31/12 18:30:00
Ver: 04.06.05 |
| 4. <i>Processor</i> | : Intel® Core™ i3-2370QM
CPU @ 2.40GHz (4 CPUs) |
| 5. <i>Memory</i> | : 2048MB RAM |
| 6. <i>Operating System</i> | : Windows 8 Pro 64-bit
(6.3, Build 9600) |
| 7. <i>Product ID</i> | :XRTNK-WDYV8-7THJ8-QCFD8-K2BQH |

4.1 CCT pada Sistem 3-generator Fouad Anderson dengan Mempertimbangkan Gangguan Hubung Singkat Tidak Seimbang

Metode *critical trajectory* diterapkan pada sistem Fouad Anderson 3 generator 9 bus. Setelah menjalankan program BCU-Shadowing maka didapatkan nilai CUEP dan indeks energi potensial dari setiap generator yang ada. Generator dengan energy terbesar sebagai generator kritis sudah ditemukan untuk nantinya dimasukkan pada *weighting matrix*. Berikut *single line diagram* dari sistem tersebut:



Gambar 4.1 Sistem 3-generator 9-bus Fouad Anderson

Dari Gambar 4.1 telah ditentukan letak gangguan terjadi, yaitu di masing-masing titik pada saluran transmisi dengan kode A-I. Gangguan diasumsikan terjadi di 9 titik saluran transmisi tersebut, dengan asumsi:

- A : titik gangguan antara bus 1 dan bus 4
- B : titik gangguan antara bus 2 dan bus 7
- C : titik gangguan antara bus 3 dan bus 9
- D : titik gangguan antara bus 4 dan bus 5
- E : titik gangguan antara bus 4 dan bus 6
- F : titik gangguan antara bus 5 dan bus 7
- G : titik gangguan antara bus 7 dan bus 8
- H : titik gangguan antara bus 6 dan bus 9
- I : titik gangguan antara bus 8 dan bus 9

Sedangkan untuk spesifikasi data dari saluran transmisi sistem dan spesifikasi data dari bus sistem dilampirkan secara berturut-turut pada Tabel 4.1., 4.2., dan Tabel 4.3.

4.1.1 Parameter yang dibutuhkan untuk Perhitungan CCT

Terdapat beberapa parameter yang harus diinputkan terlebih dahulu sebelum dapat dilakukan perhitungan CCT. Berikut adalah data admitansi urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol. Dimana antara admintansi urutan positif dan negatif kami asumsikan sama. Sedangkan untuk saluran nol kami asumsikan $\frac{1}{3}$ dari saluran urutan positif dan *Line Charging* urutan nol diabaikan. Paraameter-parameter saluran admitansi dan generator ini diinisiasi pada aliran daya *newton raphson*.

Tabel 4.1 Spesifikasi data saluran transmisi sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson untuk impedansi urutan positif dan negatif

No.	Bus asal	Bus dituju	R (p.u.)	X (p.u.)	Half Line Charging Susceptance (p.u)
1	1	4	0,0000	0,0576	0,0000
2	2	7	0,0000	0,0625	0,0000
3	3	9	0,0000	0,0586	0,0000
4	4	5	0,0100	0,0850	0,0880
5	4	6	0,0170	0,0920	0,0790
6	5	7	0,0320	0,1610	0,1530
7	6	9	0,0390	0,1700	0,1790
8	7	8	0,0085	0,0720	0,0745
9	8	9	0,0119	0,1008	0,1045

Tabel 4.2 Spesifikasi data saluran transmisi sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson untuk impedansi urutan nol

No.	Bus asal	Bus dituju	R (p.u.)	X (p.u.)
1	1	4	0,00000	0,01920
2	2	7	0,00000	0,02083
3	3	9	0,00000	0,01953
4	4	5	0,00333	0,02833
5	4	6	0,00566	0,03067
6	5	7	0,01067	0,05364
7	6	9	0,01300	0,05667
8	7	8	0,00283	0,02400
9	8	9	0,00396	0,03360

Tabel 4.3 Spesifikasi data bus sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)
1	200,00	0,00	0,00	0,00
2	163,00	0,00	0,00	0,00
3	85,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	125,00	50,00
6	0,00	0,00	90,00	30,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	100,00	35,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00

Kemudian mencari parameter dari analisa power flow sistem, untuk di-*input*-kan pada perhitungan selanjutnya. Parameter hasil *power flow* tersebut antara lain,

Table 4.4 Parameter yang didapatkan dari hasil *power flow*

Gen	V (p.u.)	S (p.u.)	Ea (p.u.)
1	1,04	$0,71 + j0,270$	$1,05 + j0,041$
2	$1,016 + j0,165$	$1,63 + j0,066$	$0,98 + j0,354$
3	$1,021 + j0,083$	$0,85 - j0,108$	$0,99 + j0,231$

Setelah parameter-parameter di atas didapatkan pada perhitungan aliran daya, kemudian dikerjakan perhitungan untuk menentukan nilai CCT pada masing-masing titik gangguan.

4.1.2 Perhitungan CCT pada Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad Anderson dengan Mempertimbangkan Gangguan Hubung Singkat Tidak Seimbang

Untuk membuktikan keefektifan dari metode yang diajukan, pada kali ini metode coba diterapkan pada sistem 3 generator 9 bus dari Fouad Anderson sesuai Gambar 4.1. Pada *single diagram* tersebut diasumsikan bahwa sistem merupakan *double circuit*/saluran ganda. Ketika terjadi hubung singkat tidak simetri pada sistem membuat salah satu saluran terganggu/tidak beroperasi sehingga aliran daya ditampung oleh saluran yang lain.

Data dari hasil analisa *power flow* selanjutnya dilakukan reduksi matrik untuk mempermudah perhitungan selanjutnya. Pada metode *Range Kutta* orde ke-4 memodelkan sistem dari hasil perhitungan daya

mekanis dan elektrik sistem ke dalam domain waktu saat sebelum gangguan sampai gangguan dengan *time step 0.01 sec*. CCT (Critical Clearing Time) didapatkan dari *critical trajectory* dari *on fault trajectory* hingga *exit point*. Pemodelan sistem saat stbil hingga terjadi *fault* dilakukan dengan metode TDS, nilai awal yang disimpan sebagai $x^0(\tau)$ sebagai fungsi waktu, dan τ pada memori computer yang melakukan *running*. Lalu, $x^0(\tau)$ dengan nilai τ tertentu dipilih sebagai kondisi awal untuk menyimulasikan kondisi dinamis sekaligus pengevaluasi stabilitas dari sistem. Proses tersebut dilakukan secara terus menerus dengan mengganti-ganti nilai dari τ , dimana proses tersebut lebih dikenal dengan istilah iterasi, dalam penelitian ini menggunakan *newton raphson*. Metode pencarian biner pangkat tiga dari *spline* digunakan untuk menentukan nilai kritis dari τ , yaitu CCT. Pada penelitian ini, *exit point* merupakan titik batas kestabilan sistem yang mempresentasikan enerrgi kritis setelah terjadi gangguan. Pada sistem satu mesin terhubung ke *infinite bus* nilai *SEP* (*Stable Equilibrium Point*) dan *UEP* (*Unstable Equilibrium Point*) dapat langsung ditentukan, sedangkan untuk sistem multi mesin maka untuk *exit point* diprediksi dan pendekatan dari nilai *CUEP* (*Controlling Unstable Equilibrium Point*). Titik *exit point* ini selanjutnya digunakan sebagai acuan untuk menentukan nilai CCT (*Critical Clearing Time*).

Tabel 4.5 Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan *critical trajectory* dan TDS pada sistem 3 generator 9 bus dengan gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah

Fault Point	Open Line	Critical Trajectory		Time Domain Simulation (TDS)		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0,2602	0,3207	0,25-0,26	113,79	-0,07
B	2-7	0,2457	0,5551	0,24-0,25	117,71	0,0
C	3-9	0,2602	0,5529	0,25-0,26	117,66	-0,07
D	4-5	0,2641	0,2712	0,26-0,27	114,96	0,0
E	4-6	0,2645	0,3506	0,26-0,27	115,81	0,0
F	5-7	0,2531	0,2597	0,25-0,26	114,64	0,0
G	7-8	0,2605	0,5463	0,26-0,27	117,61	0,0
H	6-9	0,2552	0,5482	0,25-0,26	117,64	0,0
I	8-9	0,2632	0,5440	0,26-0,27	117,61	0,0

Tabel 4.6 Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan *critical trajectory* dan TDS pada sistem 3 generator 9 bus dengan gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<i>Critical Trajectory</i>		<i>Time Domain Simulation (TDS)</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0,2604	0,2604	0,25-0,26	115,05	0,15
B	2-7	0,2484	0,5444	0,24-0,25	117,43	0,0
C	3-9	0,2591	0,5435	0,25-0,26	117,35	0,0
D	4-5	0,2641	0,2830	0,26-0,27	114,99	0,0
E	4-6	0,2645	0,3709	0,26-0,27	115,79	0,0
F	5-7	0,2531	0,2597	0,25-0,26	114,80	0,0
G	7-8	0,2621	0,4480	0,26-0,27	116,51	0,0
H	6-9	0,2552	0,5488	0,25-0,26	117,68	0,0
I	8-9	0,2621	0,5447	0,26-0,27	117,57	0,0

Tabel 4.7 Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan *critical trajectory* dan TDS pada sistem 3 generator 9 bus dengan gangguan hubung singkat antara 2 fasa langsung

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<i>Critical Trajectory</i>		<i>Time Domain Simulation (TDS)</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0,2601	0,2453	0,25-0,26	114,93	0,03
B	2-7	0,2439	0,5528	0,24-0,25	117,72	0,0
C	3-9	0,2585	0,5537	0,25-0,26	117,54	0,0
D	4-5	0,2641	0,2822	0,26-0,27	115,21	0,0
E	4-6	0,2645	0,3006	0,26-0,27	115,43	0,0
F	5-7	0,2531	0,2688	0,25-0,26	114,94	0,0
G	7-8	0,2649	0,5719	0,26-0,27	118,48	0,0
H	6-9	0,2551	0,6307	0,25-0,26	120,54	0,0
I	8-9	0,2644	0,4085	0,26-0,27	118,12	0,0

Tabel 4.8 Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan *critical trajectory* dan TDS pada sistem 3 generator 9 bus dengan gangguan hubung singkat 3 fasa

Fault Point	Open Line	Critical Trajectory		Time Domain Simulation (TDS)		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-4	0,2598	0,2791	0,25-0,26	114,93	0,0
B	2-7	0,2520	0,5484	0,24-0,25	117,61	0,7
C	3-9	0,2602	0,5435	0,25-0,26	117,53	0,07
D	4-5	0,2640	0,2794	0,26-0,27	114,86	0,0
E	4-6	0,2645	0,3345	0,26-0,27	115,47	0,0
F	5-7	0,2531	0,2605	0,25-0,26	114,70	0,0
G	7-8	0,2614	0,5428	0,26-0,27	117,89	0,0
H	6-9	0,2565	0,5501	0,25-0,26	117,88	0,0
I	8-9	0,2693	0,5475	0,26-0,27	117,83	0,0

Simulasi yang dilakukan di atas mempertimbangkan beberapa jenis gangguan tidak seimbang. Lalu metode *critical trajectory* dibandingkan dengan metode konvensional TDS untuk dianalisa error serta beberapa aspek lainnya. Nilai CCT hasil perbandingan kedua metode tersebut dilampirkan pada Tabel 4.5. - Tabel 4.8. Hasil perhitungan pada tabel tersebut menyatakan bahwa nilai CCT berbeda di setiap titik gangguannya. Misalkan, pada gangguan G akibat hubung singkat satu fasa ke tanah, CCT dari metode TDS adalah 0,26-0,27. Hal itu berarti sistem akan stabil apabila gangguan diputus pada waktu 0.26 dan apabila setelah 0.27 maka sistem menjadi tidak stabil. Maka dapat diamati bahwa nilai CCT dari *critical trajectory* berada diantara *range* waktu dari hasil simulasi TDS tersebut. Dalam simulasi ini mempertimbangkan *damping coefficient* dari setiap generator yang ada, sehingga dapat memodelkan keadaan sistem secara *real time*.

Waktu simulasi (CPU time) tergantung dari kecepatan processor dan spesifikasi dari perangkat yang digunakan. Waktu simulasi dari metode konvensional TDS lebih lama 10 kali lipat daripada metode *critical trajectory* untuk mendapatkan nilai CCT-nya, dan didapatkan dengan *trial and error* untuk setiap titik gangguan. Bila diasumsikan untuk mendapatkan *range* waktu stabil dan tidak stabilnya membutuhkan 10 kali percobaan dimana di setiap percobaannya diasumsikan membutuhkan waktu 10 detik ditambah waktu *running* programnya,

maka dapat dirumuskan waktu simulasi (*CPU time*) untuk mendapatkan *range* waktu antara stabil dan tidak stabilnya adalah:

$$CPU[s] = 10 \times (10 + \text{waktu running program}) \quad (4.1.2.1)$$

Sedangkan waktu simulasi dari metode *critical trajectory* didapatkan langsung dari waktu proses *running* programnya.

Untuk beberapa percobaan, terjadi beberapa *error* pada hasil percobaan. *Error* ini terjadi apabila CCT berada di luar batasan *TDS* (*Time Domain Simulation*). Hal ini terjadi apabila CCT berada di bawah *range* stable maka menggunakan *rs*. Sedangkan untuk nilai CCT lebih dari nilai tidak stabil maka menggunakan *ru*. Sehingga hasil dapat menjadi positif maupun negatif. Berikut persamaan untuk mencari *error*-nya,

$$\text{error (+)} = \frac{CCT - rs}{rs} \quad (4.1.2.2)$$

$$\text{error (-)} = \frac{CCT - ru}{ru} \quad (4.1.2.3)$$

Sesuai Tabel 4.5 sampai dengan Tabel 4.8 dapat diamati bahwa nilai *error* setiap titik adalah kurang dari 0.8% dalam kasus ini hasil penelitian masih dapat dikatakan setting nilai CCT (*Critical Clearing Time*) dari CB masih dapat dikatakan aman untuk diterapkan pada sistem.

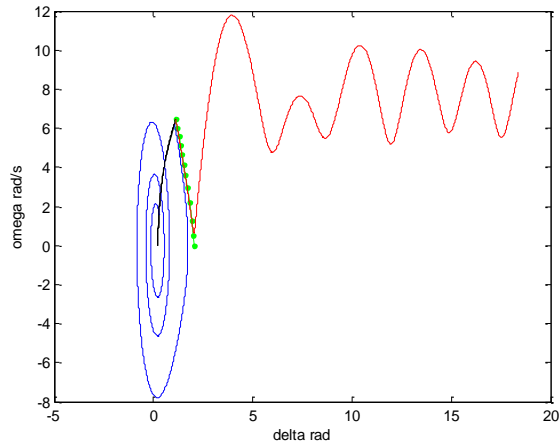
4.1.3 Analisa Grafik pada Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad Anderson dengan Mempertimbangkan Gangguan Hubung Singkat Tidak Seimbang

Pada Gambar 4.2 – Gambar 4.13 dilampirkan beberapa grafik kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson tanpa mempertimbangkan gangguan tidak seimbang pada perhitungannya. Grafik yang ditampilkan dibatasi grafik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ), grafik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu (*sec*), grafik sudut rotor (δ) terhadap waktu (*sec*), karena grafik daya mekanis (P_m) terhadap waktu (*sec*) dan grafik tegangan internal generator (E_a) terhadap waktu (*sec*) terlalu sulit untuk dibedakan kondisi stabil dan kondisi tidak stabilnya. Pada setiap karakteristik grafik yang disajikan, memiliki tiga warna kurva yang digunakan untuk *plotting*. Warna pada ketiga kurva tersebut dapat dijelaskan:

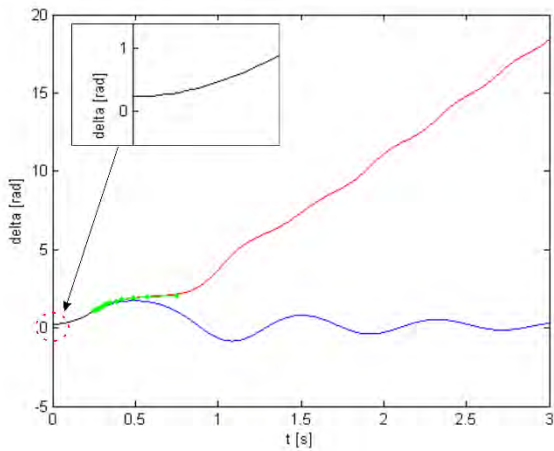
- a. Merah : kurva kondisi tidak stabil yang didapat dari perhitungan menggunakan metode konvensional TDS
- b. Biru : kurva kondisi stabil yang didapat dari perhitungan menggunakan metode konvensional TDS
- c. Hijau : kurva yang didapatkan dari perhitungan menggunakan metode *critical trajectory*

Maka hasil simulasi dengan menggunakan metode *critical trajectory* pada beberapa titik gangguan pada sistem adalah sebagai berikut, untuk grafik yang lain dapat dilihat pada lampiran.

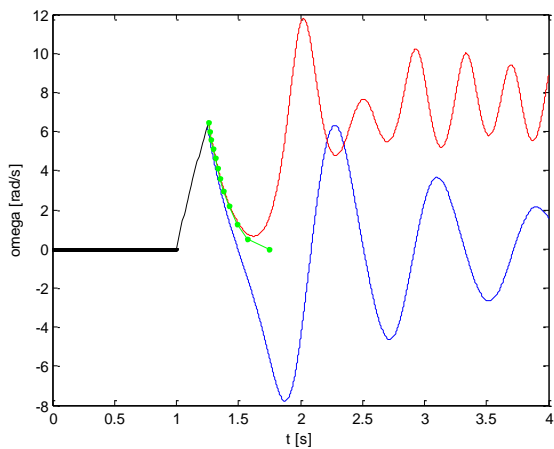
- a. Gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah



Gambar 4.2. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah terjadi di titik A



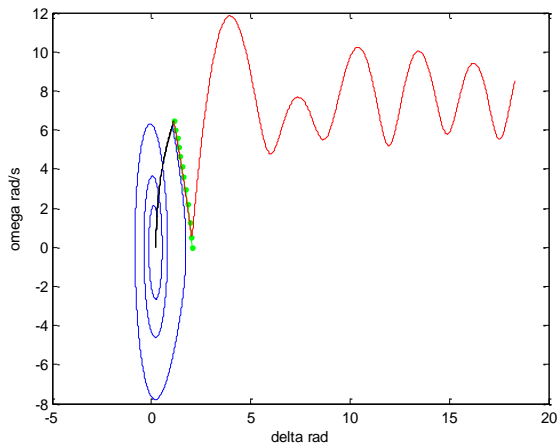
Gambar 4.3. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah terjadi di titik A



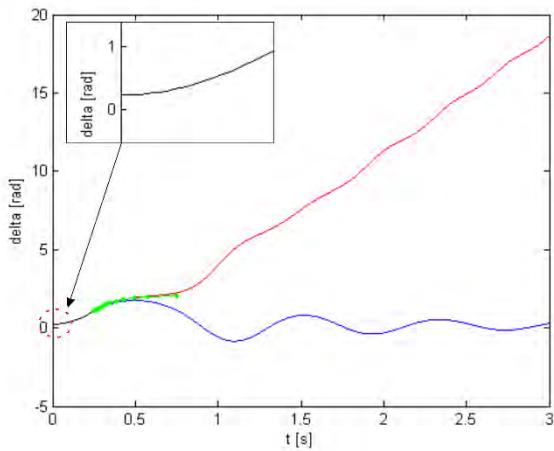
Gambar 4.4. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator dengan *damping* bila gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah terjadi di titik A

Dari Gambar 4.2 – Gambar 4.4 dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dalam ketiga domain tersebut (δ terhadap waktu, ω terhadap waktu, dan ω terhadap δ). Pada gambar 4.3 dapat diamati perubahan δ terhadap waktu (t), pada kasus ini perubahan sudut rotor sangat terlihat pada saat diputus seelum dan setelah CCT, apabila diputus setelah waktu *Critical Clearing Time* maka sudut rotor terus bertambah dan berisolasi dengan nilai yang sangat signifikan. Pada gambar 4.2 garis biru menunjukkan sistem kembali stabil setelah gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah diputus sebelum waktu *Critical Clearing Time*, sedangkan garis merah mempresentasikan keadaan sistem yang tidak stabil karena system diputus setelah *Critical Clearing Time*. Apabila CB dari saluran yang mengalami gangguan diputus kurang dari CCT (masuk di daerah *stable after fault*) maka sistem beresilasi menuju keadaan stabil kembali. Dan sebaliknya, apabila CB dari sistem yang mengalami gangguan diputus lebih dari CCT (masuk di daerah *unstable after fault*) maka sistem menjadi keluar dari keadaan stabil dan dapat mengakibatkan *blackout*. Sedangkan titik gangguan hubung singkat satu fasa yang lain dapat dilihat di lampiran.

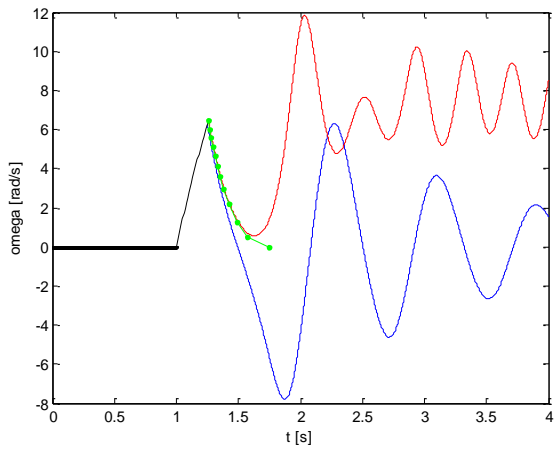
b. Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah



Gambar 4.5. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah terjadi di titik A



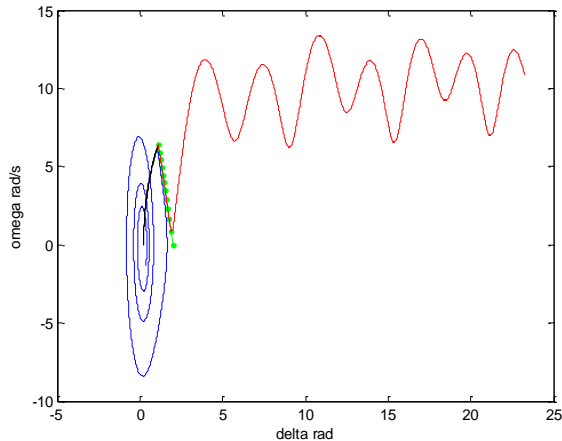
Gambar 4.6. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah terjadi di titik A



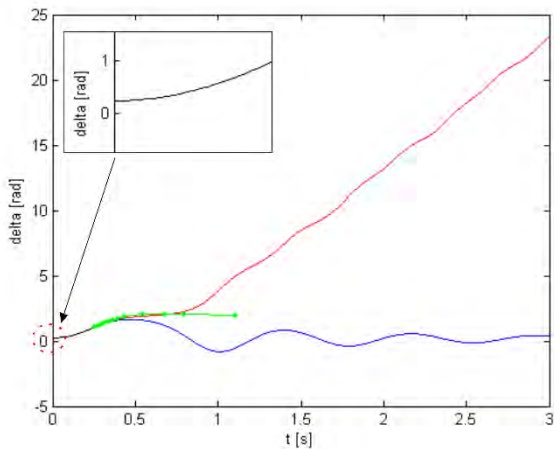
Gambar 4.7. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (*s*) pada sistem 3 generator dengan *damping* bila gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah terjadi di titik A

Dari Gambar 4.5 – Gambar 4.7 adalah keadaan sistem sebelum, saat, dan setelah terjadi gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah. Dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dalam ketiga domain tersebut (ω terhadap waktu, δ terhadap waktu, dan ω terhadap (δ). Pada gambar 4.5 garis biru menunjukkan *stable case after fault*, garis merah menunjukkan *unstable case after fault* dan lintasan kritis berwarna hijau pada gambar seperti penjelasan di bab 2.7. Pada gambar 4.7 dapat dilihat ketika sistem yang awalnya stabil kemudian pada detik pertama mendapatkan gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah sehingga terjadi perubahan kecepatan sudut rotor (ω) terhadap domain waktu (s), keadaan *pre-fault* dimodelkan dengan garis lurus yang menggambarkan sistem dalam keadaan sebelum terjadi gangguan. Ketika gangguan diputus setelah *Critical Clearing Time* maka kecepatan sudut rotor mengalami percepatan. Kecepatan dari sudut rotor terus bertambah sampai generator lepas dari sistem. Sedangkan titik gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah yang lain dapat dilihat di lampiran.

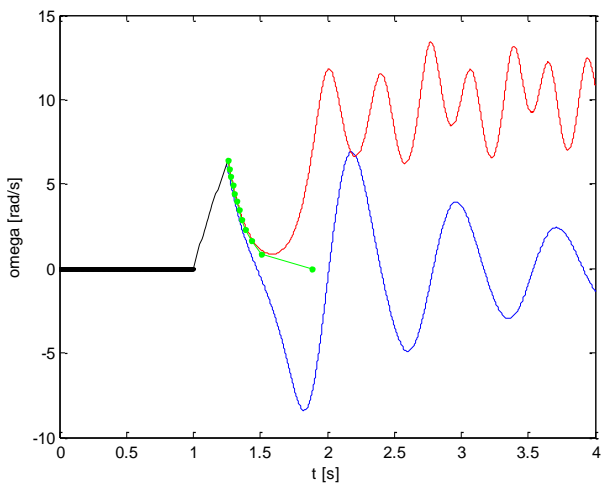
c. Gangguan hubung singkat dua fasa langsung



Gambar 4.8. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat dua fasa langsung di titik C



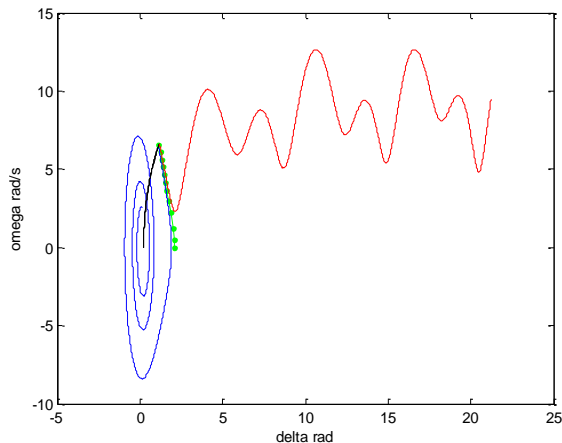
Gambar 4.9. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat dua fasa langsung terjadi di titik C



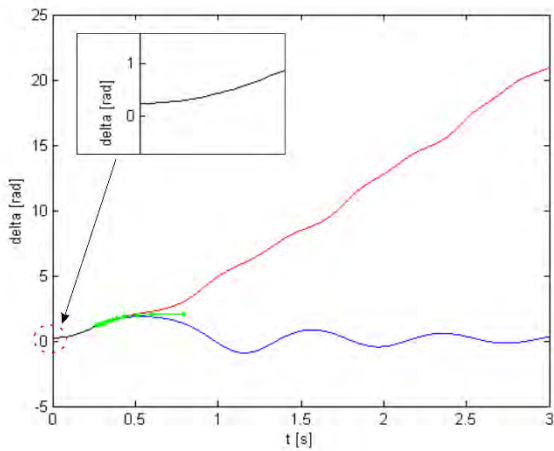
Gambar 4.10. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator dengan *damping* bila gangguan hubung singkat dua fasa langsung terjadi di titik C

Dari Gambar 4.8 – Gambar 4.10 mempresentasikan sistem apabila mendapat gangguan hubung singkat dua fasa langsung. Dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dalam ketiga domain tersebut (ω terhadap δ), ω terhadap waktu, dan δ terhadap waktu. Pada gambar 4.10 mempresentasikan domain δ terhadap waktu, sistem yang stabil setelah terjadi gangguan sudut rotor tidak mengalami perubahan secara signifikan. Pada gambar 4.10 dapat dilihat ketika sistem yang awalnya stabil kemudian pada detik pertama mendapatkan gangguan hubung singkat dua fasa langsung sehingga terjadi perubahan kecepatan sudut rotor (ω) terhadap domain waktu (s). Ketika gangguan diputus setelah *Critical Clearing Time* maka kecepatan sudut rotor mengalami percepatan. Apabila gangguan tidak segera tidak segera dihentikan dengan membuka CB terdekat maka sistem menjadi *breakout* karena generator pada sistem lepas sinkron dari jaringan interkoneksi. Sedangkan titik gangguan hubung singkat antara dua fasa terganggu yang lain dapat dilihat di lampiran.

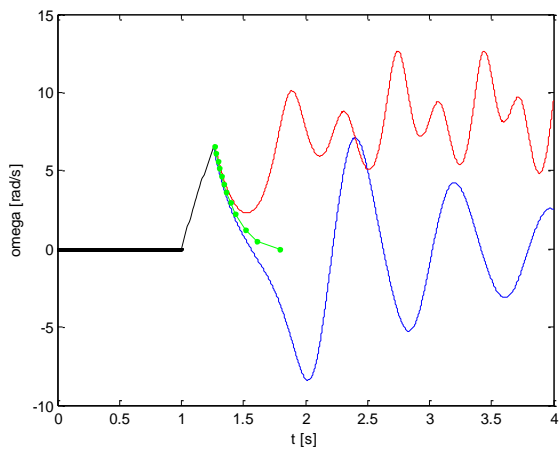
d. Gangguan hubung singkat 3 fasa



Gambar 4.11. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat tiga fasa terjadi di titik D



Gambar 4.12. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator 9 bus dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung tiga fasa terjadi di titik D

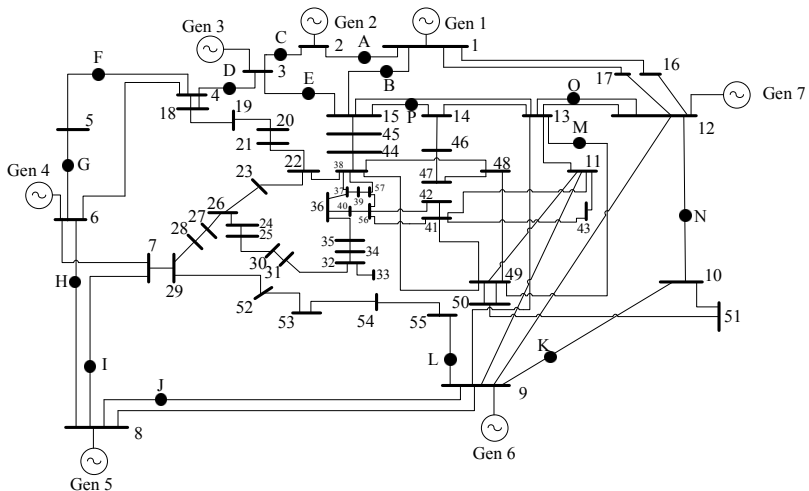


Gambar 4.13. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (s) pada sistem 3 generator dengan *damping* bila gangguan hubung singkat tiga fasa terjadi di titik D

Dari Gambar 4.11 – Gambar 4.13 mempresentasikan sistem apabila mendapat gangguan hubung singkat tiga fasa. Dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dalam ketiga domain tersebut (ω terhadap δ), ω terhadap waktu, dan δ terhadap waktu. Pada gambar di atas nilai CCT (*Critical Clearing Time*) menggunakan metode *trapezoidal* adalah 0.2640 detik sedangkan apabila menggunakan *Time Domain Simulation* adalah 0,26 – 0,27 untuk menggambarkan keadaan stabil dan keadaan tidak stabil setelah dilakukan beberapa percobaan iterasi pada sistem perhitungan. Dalam hal ini berarti sistem harus membuka *circuit breaker* sebelum 0,2640 agar sistem dapat kembali stabil setelah terjadi gangguan. Untuk gambar sistem akibat hubung singkat 3 fasa yang lain dapat dilihat di lampiran.

4.2 CCT pada Sistem IEEE 57 7-generator 57 Bus dengan Mempertimbangkan Gangguan Hubung Singkat Tidak Seimbang

Untuk membuktikan keakuratan metode *critical trajectory* mempertimnangkan gangguan hubung singkat tidak seimbang, maka selanjutnya diterapkan pada sistem yang lebih besar dan *real*, yaitu IEEE57 7 generator 57 bus.



Gambar 4.14 Sistem 7-generator 57-bus IEEE57

Dari Gambar 4.14 telah ditentukan letak gangguan terjadi, yaitu di masing-masing titik pada saluran transmisi dengan kode A-P. Gangguan diasumsikan terjadi di 16 titik saluran transmisi tersebut, dengan asumsi:

- A : titik gangguan antara bus 1 dan bus 2
- B : titik gangguan antara bus 1 dan bus 15
- C : titik gangguan antara bus 2 dan bus 3
- D : titik gangguan antara bus 3 dan bus 4
- E : titik gangguan antara bus 3 dan bus 15
- F : titik gangguan antara bus 4 dan bus 5
- G : titik gangguan antara bus 5 dan bus 6
- H : titik gangguan antara bus 6 dan bus 7
- I : titik gangguan antara bus 7 dan bus 8
- J : titik gangguan antara bus 8 dan bus 9
- K : titik gangguan antara bus 9 dan bus 10
- L : titik gangguan antara bus 9 dan bus 55
- M : titik gangguan antara bus 11 dan bus 13
- N : titik gangguan antara bus 12 dan bus 10
- O : titik gangguan antara bus 12 dan bus 13
- P : titik gangguan antara bus 14 dan bus 15

Sedangkan untuk spesifikasi data dari saluran transmisi sistem dan spesifikasi data dari bus sistem dilampirkan secara berturut-turut pada Tabel 4.9., 4.10., dan Tabel 4.11.

4.2.1 Parameter yang dibutuhkan untuk perhitungan CCT

Terdapat beberapa parameter yang harus diinputkan terlebih dahulu sebelum dapat dilakukan perhitungan CCT. Berikut adalah data admitansi urutan positif, urutan negatif, dan urutan nol. Dimana antara admintansi urutan positif dan negatif kami asumsikan sama. Sedangkan untuk saluran nol kami asumsikan $\frac{1}{3}$ dari saluran urutan positif dan *Line Charging* urutan nol diabaikan. Paraameter-parameter saluran admitansi dan generator ini diinisiasi pada aliran daya *newton raphson*.

Tabel 4.9 Spesifikasi data saluran transmisi sistem 7 generator 57 bus IEEE57 untuk impedansi urutan positif dan negatif

No.	Bus asal	Bus dituju	R	X	<i>Half Line Charging Susceptance (p.u)</i>
1	1	2	0,0083	0,0280	0,0645
2	2	3	0,0298	0,0850	0,0409

Lanjutan Tabel 4.9 Spesifikasi data saluran transmisi sistem 7 generator 57 bus IEEE57 untuk impedansi urutan positif dan negatif

No.	Bus asal	Bus dituju	R (p.u.)	X (p.u.)	<i>Half Line Charging Susceptance (p.u)</i>
3	3	4	0,0112	0,0366	0,0190
4	4	5	0,0625	0,1480	0,0129
5	4	6	0,0430	0,1020	0,0174
6	6	8	0,0200	0,1730	0,0138
7	6	9	0,0339	0,0505	0,0235
8	8	9	0,0099	0,1679	0,0274
9	9	10	0,0369	0,0848	0,0220
10	9	11	0,0258	0,0848	0,0109
11	9	12	0,0648	0,2950	0,0386
12	9	13	0,0481	0,1580	0,0203
13	13	14	0,0132	0,0434	0,0055
14	13	15	0,0269	0,0869	0,0115
15	1	15	0,0178	0,0910	0,0494
16	1	16	0,0454	0,2060	0,0273
17	1	17	0,0238	0,1080	0,0143
18	3	15	0,0162	0,0530	0,0272
19	4	18	0,0000	0,2423	0,0000
20	5	6	0,0302	0,0641	0,0062
21	7	8	0,1390	0,0712	0,0097
22	10	12	0,0277	0,1262	0,0164
23	11	13	0,0223	0,0732	0,0094
24	12	13	0,0178	0,0580	0,3020
25	12	16	0,0180	0,0812	0,0108
26	12	17	0,0397	0,1790	0,0238
27	14	15	0,0171	0,0547	0,0074
28	18	19	0,4610	0,6850	0,0000
29	19	20	0,2830	0,4340	0,0000
30	20	21	0,0000	0,7667	0,0000
31	21	22	0,0736	0,1170	0,0000
32	22	23	0,0099	0,0152	0,0000
33	23	24	0,1660	0,2560	0,0042
34	24	25	0,0000	0,6028	0,0000
35	24	26	0,0000	0,0473	0,0000
36	26	27	0,1650	0,2540	0,0000
37	27	28	0,0618	0,0954	0,0000

Lanjutan Tabel 4.9 Spesifikasi data saluran transmisi sistem 7 generator 57 bus IEEE57 untuk impedansi urutan positif dan negatif

No.	Bus asal	Bus dituju	R (p.u.)	X (p.u.)	Half Line Charging Susceptance (p.u)
38	28	29	0,0418	0,0587	0,0000
39	7	29	0,0000	0,0648	0,0000
40	25	30	0,1350	0,2020	0,0000
41	30	31	0,3260	0,4970	0,0000
42	31	32	0,5070	0,7550	0,0000
43	32	33	0,0392	0,0360	0,0000
44	32	34	0,0000	0,9530	0,0000
45	34	35	0,0520	0,0780	0,0016
46	35	36	0,0430	0,0537	0,0008
47	36	37	0,0290	0,0366	0,0000
48	37	38	0,0651	0,1009	0,0010
49	37	39	0,0239	0,0379	0,0000
50	36	40	0,0300	0,0466	0,0000
51	22	38	0,0192	0,0295	0,0000
52	11	41	0,0000	0,7490	0,0000
53	41	42	0,2070	0,3520	0,0000
54	41	43	0,0000	0,4120	0,0000
55	38	44	0,0289	0,5850	0,0010
56	15	45	0,0000	0,1042	0,0000
57	14	46	0,0000	0,0735	0,0000
58	46	47	0,0230	0,0680	0,0016
59	47	48	0,0182	0,0233	0,0000
60	48	49	0,0834	0,1290	0,0024
61	49	50	0,0801	0,1280	0,0000
62	50	51	0,1386	0,2200	0,0000
63	10	51	0,0000	0,0712	0,0000
64	13	49	0,0000	0,1910	0,0000
65	29	52	0,1442	0,1870	0,0000
66	52	53	0,0762	0,0984	0,0000
67	53	54	0,1878	0,2320	0,0000
68	54	55	0,1732	0,2265	0,0000
69	11	43	0,0000	0,1530	0,0000
70	44	45	0,0624	0,1242	0,0020
71	40	56	0,0000	1,1950	0,0000

Lanjutan Tabel 4.9 Spesifikasi data saluran transmisi sistem 7 generator 57 bus IEEE57 untuk impedansi urutan positif dan negatif

No.	Bus asal	Bus dituju	R (p.u.)	X (p.u.)	Half Line Charging Susceptance (p.u)
72	41	56	0,5530	0,5490	0,0000
73	42	56	0,2125	0,3540	0,0000
74	39	57	0,0000	1,3550	0,0000
75	56	57	0,1740	0,2600	0,0000
76	38	49	0,1150	0,1770	0,0030
77	38	48	0,0312	0,0482	0,0000
78	9	55	0,0000	0,1205	0,0000

Tabel 4.10. Spesifikasi data saluran transmisi sistem 7 generator 57 bus IEEE57 untuk impedansi urutan nol

No.	Bus asal	Bus dituju	R (p.u.)	X (p.u.)
1	1	2	0,0028	0,0093
2	2	3	0,0099	0,0283
3	3	4	0,0037	0,0122
4	4	5	0,0208	0,0440
5	4	6	0,0143	0,0493
6	6	8	0,0067	0,0340
7	6	9	0,0113	0,0577
8	8	9	0,0033	0,0168
9	9	10	0,0123	0,0560
10	9	11	0,0086	0,0283
11	9	12	0,0216	0,0983
12	9	13	0,0160	0,0527
13	13	14	0,0044	0,0145
14	13	15	0,0090	0,0290
15	1	15	0,0059	0,3033
16	1	16	0,0151	0,0687
17	1	17	0,0079	0,0360
18	3	15	0,0540	0,0177
19	4	18	0,0000	0,0808
20	5	6	0,0101	0,0214
21	7	8	0,0463	0,0237
22	10	12	0,0092	0,0421
23	11	13	0,0074	0,0244

Lanjutan Tabel 4.10 Spesifikasi data saluran transmisi 7 generator 57 bus IEEE57 untuk impedansi urutan nol

No.	Bus asal	Bus dituju	R (p.u.)	X (p.u.)
24	12	13	0,0059	0,0193
25	12	16	0,0060	0,0271
26	12	17	0,0132	0,0597
27	14	15	0,0057	0,0182
28	18	19	0,1537	0,2283
29	19	20	0,0943	0,1447
30	20	21	0,0000	0,2556
31	21	22	0,0245	0,0390
32	22	23	0,0033	0,0051
33	23	24	0,0553	0,0853
34	24	25	0,0000	0,2009
35	24	26	0,0000	0,0158
36	26	27	0,0550	0,0847
37	27	28	0,0206	0,0318
38	28	29	0,0139	0,0196
39	7	29	0,0000	0,0216
40	25	30	0,0450	0,0673
41	30	31	0,1087	0,1657
42	31	32	0,1690	0,2517
43	32	33	0,0131	0,0120
44	32	34	0,0000	0,3177
45	34	35	0,0173	0,0260
46	35	36	0,0143	0,0179
47	36	37	0,0097	0,0122
48	37	38	0,0217	0,0336
49	37	39	0,0080	0,0126
50	36	40	0,0100	0,0155
51	22	38	0,0064	0,0098
52	11	41	0,0000	0,2497
53	41	42	0,0690	0,1173
54	41	43	0,0000	0,1373

Lanjutan Tabel 4.10 Spesifikasi data saluran transmisi sistem 7 generator 57 bus IEEE57 untuk impedansi nol

No.	Bus asal	Bus dituju	R (p.u.)	X (p.u.)
56	15	45	0,0000	0,0347
57	14	46	0,0000	0,0245
58	46	47	0,0077	0,0227
59	47	48	0,0061	0,0078
60	48	49	0,0278	0,0430
61	49	50	0,0267	0,0427
62	50	51	0,0462	0,0733
63	10	51	0,0000	0,0237
64	13	49	0,0000	0,0637
65	29	52	0,0481	0,0623
66	52	53	0,0254	0,0328
67	53	54	0,0626	0,0773
68	54	55	0,0577	0,0755
69	11	43	0,0000	0,0510
70	44	45	0,0208	0,0414
71	40	56	0,0000	0,3983
72	41	56	0,1843	0,1830
73	42	56	0,0708	0,1180
74	39	57	0,0000	0,4517
75	56	57	0,0580	0,0867
76	38	49	0,0383	0,0590
77	38	48	0,0104	0,0161
78	9	55	0,0000	0,0402

Tabel 4.11 Spesifikasi data bus sistem 7 generator 57 bus IEEE57

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)
1	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	3,00	88,00
3	40,00	0,00	41,00	21,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	13,00	4,00

Lanjutan Tabel 4.11 Spesifikasi data bus sistem 7 generator 57 bus IEEE57

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)
6	0,00	0,00	75,00	2,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00
8	450,00	0,00	150,00	22,00
9	0,00	0,00	121,00	26,00
10	0,00	0,00	5,00	2,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00
12	310,00	0,00	377,00	24,00
13	0,00	0,00	18,00	2,30
14	0,00	0,00	10,50	5,30
15	0,00	0,00	22,00	5,00
16	0,00	0,00	43,00	3,00
18	0,00	0,00	27,20	9,80
19	0,00	0,00	3,30	0,60
20	0,00	0,00	2,30	1,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	6,30	2,10
24	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	6,30	3,20
26	0,00	0,00	0,00	0,00
27	0,00	0,00	9,30	0,50
28	0,00	0,00	4,60	2,30
29	0,00	0,00	17,00	2,60
30	0,00	0,00	3,60	1,80
31	0,00	0,00	5,80	2,90
32	0,00	0,00	1,60	0,80
33	0,00	0,00	3,80	1,90
34	0,00	0,00	0,00	0,00
35	0,00	0,00	6,00	3,00
36	0,00	0,00	0,00	0,00
37	0,00	0,00	0,00	0,00
38	0,00	0,00	14,00	7,00
39	0,00	0,00	0,00	0,00
40	0,00	0,00	0,00	0,00
41	0,00	0,00	6,30	3,00
42	0,00	0,00	7,10	4,40

Lanjutan Tabel 4.11 Spesifikasi data bus sistem 7 generator 57 bus IEEE57

No. Bus	P Generator (MW)	Q Generator (MVAR)	P Beban (MW)	Q Beban (MVAR)
43	0,00	0,00	2,00	1,00
44	0,00	0,00	12,00	1,80
45	0,00	0,00	0,00	0,00
46	0,00	0,00	0,00	0,00
47	0,00	0,00	29,70	11,60
48	0,00	0,00	0,00	0,00
49	0,00	0,00	18,00	8,50
50	0,00	0,00	21,00	10,50
51	0,00	0,00	18,00	5,30
52	0,00	0,00	4,90	2,20
53	0,00	0,00	20,00	10,00
54	0,00	0,00	4,10	1,40
55	0,00	0,00	6,80	3,40
56	0,00	0,00	7,60	2,20
57	0,00	0,00	6,70	2,00

Kemudian mencari parameter dari analisa power flow sistem, untuk di-*input*-kan pada perhitungan selanjutnya. Parameter hasil *power flow* tersebut antara lain,

Tabel 4.12 Parameter yang didapat dari *power flow*

Gen	V (p.u.)	S (p.u.)	Ea (p.u.)
1	1,04	$4,250 + j1,133$	$1,3931 + j1,3241$
2	$1,009 - j0,021$	$-0,030 - j0,887$	$0,8059 - j0,0237$
3	$0,979 - j0,103$	$-0,010 - j0,117$	$0,9518 - j0,1029$
6	$0,968 - j0,149$	$-0,750 + j0,063$	$0,9593 - j0,2830$
8	$1,001 - j0,081$	$3,000 + j0,461$	$1,1228 + j0,4312$
9	$0,966 - j0,164$	$-1,210 - j0,208$	$0,8936 - j0,3700$
12	$0,998 - j0,185$	$-0,670 + j0,1041$	$1,1526 - j0,3307$

Setelah parameter-parameter di atas didapatkan pada perhitungan aliran daya, kemudian digunakan perhitungan untuk menentukan nilai CCT pada masing-masing titik gangguan.

4.2.2 Perhitungan CCT pada sistem IEEE57 7 generator 57 bus dengan Mempertimbangkan Gangguan Hubung Singkat Tidak Seimbang

Pada sub-bab sebelumnya telah dilampirkan hasil perhitungan CCT pada sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson dengan mempertimbangkan gangguan hubung singkat tidak seimbang. Selanjutnya pada sub-bab ini dilakukan simulasi dari sistem IEEE57 7 generator 57 bus. Perhitungan nilai CCT pada sistem ini seperti pada sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson.

Tabel 4.13 Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan *critical trajectory* dan TDS pada sistem 7 generator dengan gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<i>Critical Trajectory</i>		<i>Time Domain Simulation (TDS)</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0,1146	1,2538	0,11-0,12	112,53	0,0
B	1-15	0,1138	0,4824	0,11-0,12	112,80	0,0
C	2-3	0,1133	0,4602	0,11-0,12	111,44	0,0
D	3-4	0,1131	0,5140	0,11-0,12	112,05	0,0
E	3-15	0,1128	0,5146	0,11-0,12	112,28	0,0
F	4-5	0,1127	0,5069	0,11-0,12	111,93	0,0
G	6-5	0,1115	0,5615	0,11-0,12	112,48	0,0
H	6-8	0,1116	0,5257	0,11-0,12	112,02	0,0
I	7-8	0,1092	0,6451	0,11-0,12	113,33	0,0
J	8-9	0,1128	0,7171	0,10-0,11	114,10	0,0
K	9-10	0,1130	0,6271	0,11-0,12	113,15	0,0
L	9-55	0,1128	1,1737	0,11-0,12	118,51	0,0
M	11-13	0,1128	1,1737	0,11-0,12	118,51	0,0
N	12-10	0,1131	0,6828	0,11-0,12	113,69	0,0
O	12-13	0,1130	0,5889	0,11-0,12	112,95	0,0
P	14-15	0,1131	0,5140	0,11-0,12	112,05	0,0

Tabel 4.14 Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan *critical trajectory* dan TDS pada sistem 7 generator dengan gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<i>Critical Trajectory</i>		<i>Time Domain Simulation (TDS)</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0,1147	0,5101	0,11-0,12	111,96	0,0
B	1-15	0,1138	0,4798	0,11-0,12	111,82	0,0
C	2-3	0,1147	1,0461	0,11-0,12	117,54	0,0
D	3-4	0,1128	0,4826	0,11-0,12	111,92	0,0
E	3-15	0,1131	0,5865	0,11-0,12	112,95	0,0
F	4-5	0,1128	0,5502	0,11-0,12	112,33	0,0
G	6-5	0,1127	0,4659	0,11-0,12	111,41	0,0
H	6-8	0,1119	0,5138	0,11-0,12	112,09	0,0
I	7-8	0,1116	0,5356	0,11-0,12	112,42	0,0
J	8-9	0,1092	0,6457	0,10-0,11	113,43	0,0
K	9-10	0,1128	0,6268	0,11-0,12	113,10	0,0
L	9-55	0,1131	0,6451	0,11-0,12	113,53	0,0
M	11-13	0,1111	0,8641	0,11-0,12	115,56	0,0
N	12-10	0,1131	0,4696	0,11-0,12	111,54	0,0
O	12-13	0,1132	0,5142	0,11-0,12	111,93	0,0
P	14-15	0,1130	0,4515	0,11-0,12	101,46	0,0

Tabel 4.15 Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan *critical trajectory* dan TDS pada sistem 7 generator dengan gangguan hubung singkat dua fasa langsung

<i>Fault Point</i>	<i>Open Line</i>	<i>Critical Trajectory</i>		<i>Time Domain Simulation (TDS)</i>		<i>Error (%)</i>
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0,1147	0,5011	0,11-0,12	111,68	0,0
B	1-15	0,1138	0,4798	0,11-0,12	111,58	0,0
C	2-3	0,1134	0,4504	0,11-0,12	111,35	0,0
D	3-4	0,1128	0,4475	0,11-0,12	111,33	0,0
E	3-15	0,1131	0,5081	0,11-0,12	111,96	0,0

Lanjutan Tabel 4.15 Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan *critical trajectory* dan TDS pada sistem 7 generator dengan gangguan hubung singkat dua fasa langsung

Fault Point	Open Line	<i>Critical Trajectory</i>		<i>Time Domain Simulation (TDS)</i>		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
F	4-5	0,1128	0,5150	0,11-0,12	112,36	0,0
G	6-5	0,1127	0,5147	0,11-0,12	112,02	0,0
H	6-8	0,1127	0,5174	0,11-0,12	112,02	0,0
I	7-8	0,1116	0,5530	0,11-0,12	112,35	0,0
J	8-9	0,1092	0,5148	0,10-0,11	111,78	0,0
K	9-10	0,1128	0,5119	0,11-0,12	112,14	0,0
M	9-55	0,1130	0,5934	0,11-0,12	112,78	0,0
N	11-13	0,1127	0,4926	0,11-0,12	111,75	0,0
O	12-13	0,1131	0,5090	0,11-0,12	112,09	0,0
P	14-15	0,1130	0,4922	0,11-0,12	111,65	0,0

Tabel 4.16 Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan *critical trajectory* dan TDS pada sistem 7 generator dengan gangguan hubung singkat tiga fasa

Fault Point	Open Line	<i>Critical Trajectory</i>		<i>Time Domain Simulation (TDS)</i>		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
A	1-2	0,1145	0,6160	0,11-0,12	112,49	0,0
B	1-15	0,1138	0,4824	0,11-0,12	111,70	0,0
C	2-3	0,1144	0,7647	0,11-0,12	114,50	0,0
D	3-4	0,1128	0,4688	0,11-0,12	101,58	0,0
E	3-15	0,1131	0,5081	0,11-0,12	111,96	0,0
F	4-5	0,1128	0,8861	0,11-0,12	116,05	0,0
G	6-5	0,1127	0,4716	0,11-0,12	111,19	0,0
H	6-8	0,1119	0,4849	0,11-0,12	111,26	0,0
I	7-8	0,1116	0,5217	0,11-0,12	111,57	0,0
J	8-9	0,1092	0,5928	0,10-0,11	112,18	0,0
K	9-10	0,1128	0,5939	0,11-0,12	112,41	0,0

Lanjutan Tabel 4.16 Perbandingan nilai CCT hasil perhitungan dengan *critical trajectory* dan TDS pada sistem 7 generator dengan gangguan hubung singkat tiga fasa

Fault Point	Open Line	<i>Critical Trajectory</i>		<i>Time Domain Simulation (TDS)</i>		Error (%)
		CCT(s)	CPU(s)	CCT(s)	CPU(s)	
L	9-55	0,1131	0,6458	0,11-0,12	112,92	0,0
M	11-13	0,1106	0,7028	0,11-0,12	113,49	0,0
N	12-10	0,1131	0,5210	0,11-0,12	111,68	0,0
O	12-13	0,1131	0,5468	0,11-0,12	111,95	0,0
P	14-15	0,1130	0,5214	0,11-0,12	111,58	0,0

Waktu simulasi (CPU *time*) tergantung dari kecepatan processor dan spesifikasi dari perangkat yang digunakan. Waktu simulasi dari metode konvensional TDS lebih lama 10 kali lipat daripada metode *critical trajectory* untuk mendapatkan nilai CCT-nya, dan didapatkan dengan cara *trial and error* untuk setiap titik gangguan. Bila diasumsikan untuk mendapatkan *range* waktu stabil dan tidak stabilnya membutuhkan 10 kali percobaan dimana di setiap percobaannya diasumsikan membutuhkan waktu 10 detik ditambah waktu *running* programnya, maka dapat dirumuskan waktu simulasi (CPU *time*) untuk mendapatkan *range* waktu antara stabil dan tidak stabilnya adalah:

$$CPU[s] = 10 \times (10 + \text{waktu running program})$$

Sedangkan pada metode *critical trajectory* waktu sudah langsung ditampilkan. Metode yang diusulkan ini mendapatkan nilai CCT (*Critical Clearing Time*) secara langsung dan cenderung lebih cepat daripada metode *Time Domain Simulation*.

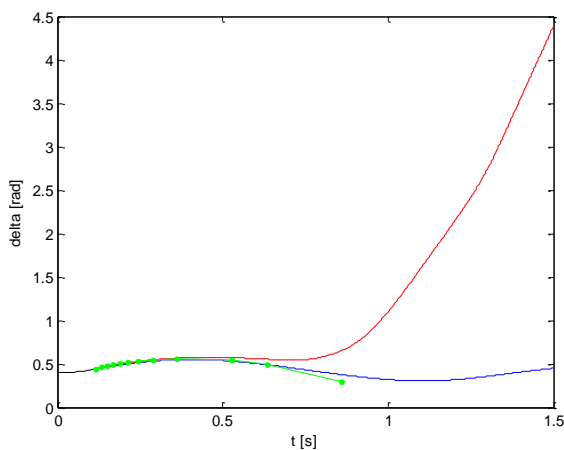
Pada Tabel 4.13 – 4.16, dapat diamati bahwa nilai *error* setiap titik adalah 0%. Hal ini menunjukkan bahwa setting nilai CCT pada CB aman untuk diterapkan pada sistem IEEE57.

4.2.3 Analisa Grafik pada Sistem IEEE57 7 Generator 57 Bus dengan Mempertimbangkan Gangguan Hubung Singkat Tidak Seimbang

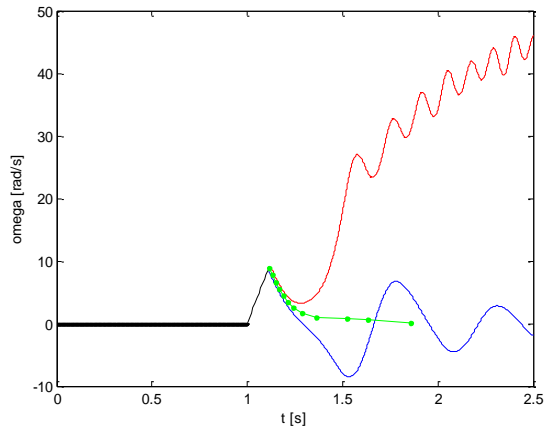
Pada Gambar 4.15 – Gambar 4.26 berikut dilampirkan grafik kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem IEEE57 7 generator 57 bus dengan mempertimbangkan gangguan hubung singkat tidak seimbang

pada perhitungannya. Grafik yang ditampilkan yaitu grafik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap sudut rotor (δ), grafik kecepatan sudut rotor (ω) terhadap waktu (sec), grafik sudut rotor (δ) terhadap waktu (sec). Pada setiap karakteristik grafik yang disajikan, memiliki tiga warna kurva yang digunakan dan memiliki fungsi sama untuk *plotting* sama seperti pada kondisi sistem 3 generator 9 bus Fuad and Anderson. Berikut grafik hasil simulasi dari sistem IEEE57 7 generator 57 bus dengan mempertimbangkan gangguan hubung singkat tidak seimbang.

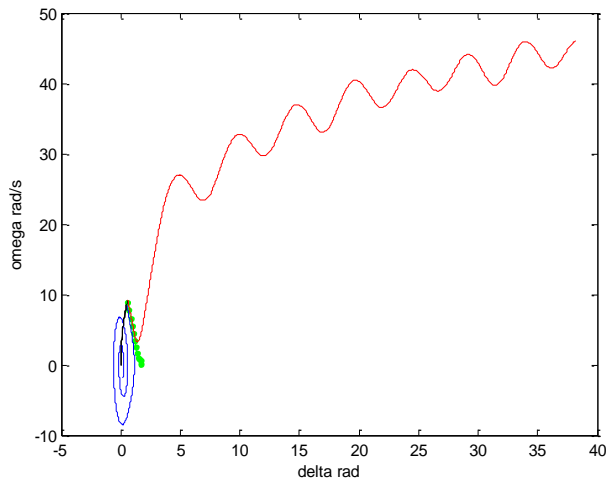
a. Gangguan satu fasa ke tanah



Gambar 4.15. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (s) pada sistem IEEE-57 dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah di titik A



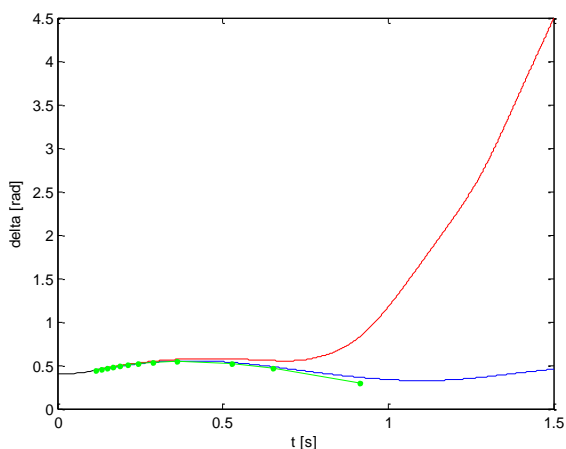
Gambar 4.16. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem IEEE-57 dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah terjadi di titik A



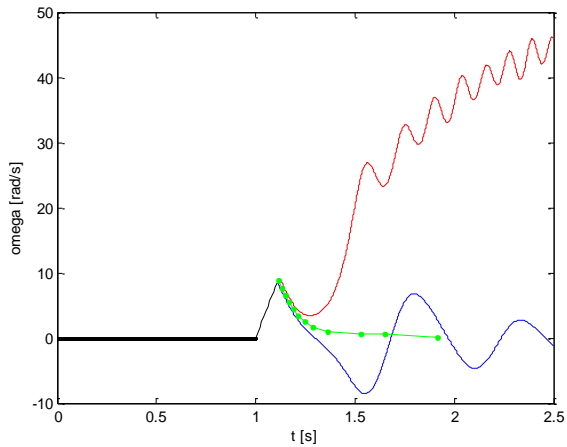
Gambar 4.17. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem IEEE-57 dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah terjadi di titik A

Pada grafik yang disajikan pada Gambar 4.15 – Gambar 4.17 dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem. Pada gambar 4.15 dan 4.16 dapat mempresentasikan perubahan sudut rotor dan kecepatan sudut rotor pada domain waktu. Saat gangguan hubung singkat satu fasa ke tanah terjadi maka sistem akan kembali stabil apabila diputus sebelum mencapai *Critical Clearing Time*, begitu pula apabila diputus setelah titik kritisnya maka sudut rotor generator akan bertambah besar dan akan mengalami percepatan secara signifikan dan akan lepas dari sinkronisasi apabila CB tidak segera terbuka dan sistem *blackout*. CCT pada gambar di atas adalah 0.1146 s menggunakan metode *critical trajectory* sedangkan apabila menggunakan simulation numerical nilai batas stabil dan tidak stabil adalah 0.11-0.12 s. Metode *Time Domain Simulation* memerlukan waktu yang cukup lama karena kita tidak dapat dengan langsung menentukan nilai CCT (*Critical Clearing Time*). Dalam sistem ini menggunakan perkiraan dan iterasi secara berkali-kali dalam perhitungannya.

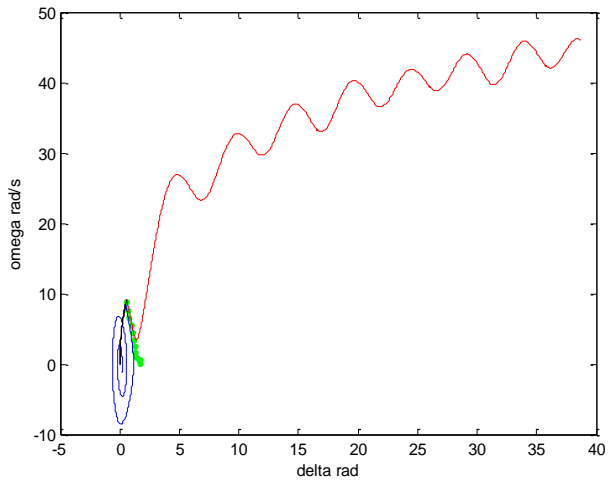
b. Gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah



Gambar 4.18. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam *rad* terhadap waktu (s) pada sistem IEEE-57 dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah terjadi di titik B



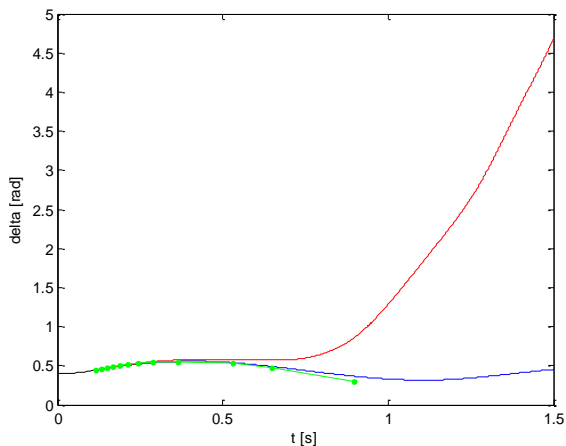
Gambar 4.19. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem IEEE-57 dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah terjadi di titik B



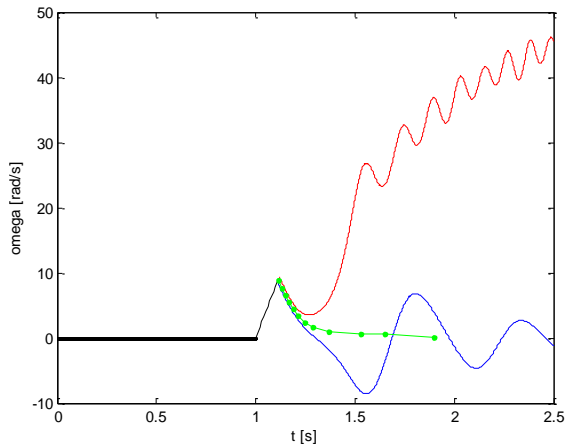
Gambar 4.20. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem IEEE-57 dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah terjadi di titik B

Pada grafik yang disajikan pada Gambar 4.18 – Gambar 4.20 dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem. Nilai CCT menggunakan *critical trajectory* adalah 0,1138 sedangkan apabila menggunakan *Time Domain Simulation* 0,11-0,12. Pada gambar 4.19 dapat kita amati perubahan dari kecepatan sudut rotor terhadap domain waktu, pada grafik tersebut sebelum waktu satu detik sistem berada dalam keadaan stabil. Namun setelah 0,1 sistem mengalami gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah, grafik berwarna biru menunjukkan sistem kembali stabil setelah terjadi gangguan karena kecepatan sudut rotor cenderung konstan terhadap perubahan waktu sedangkan grafik merah menunjukkan rotor dari generator kritis mengalami perubahan kecepatan putar sudut rotor secara terus – menerus. Apabila sistem tidak segera membuka Circuit Breaker terdekat maka generator kritis menjadi lepas sinkron. Grafik yang lain akibat sistem mengalami gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah dapat dilihat pada lampiran.

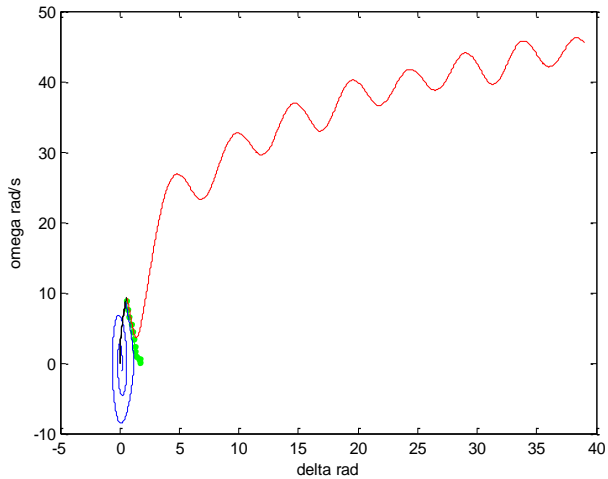
c. Gangguan hubung singkat antara dua fasa langsung



Gambar 4.21. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem IEEE-57 dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat antara dua fasa langsung di titik C



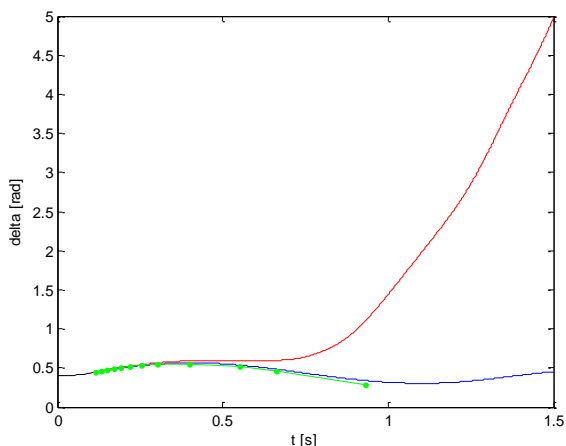
Gambar 4.22. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap waktu (s) pada sistem IEEE-57 dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat antara dua fasa langsung terjadi di titik C



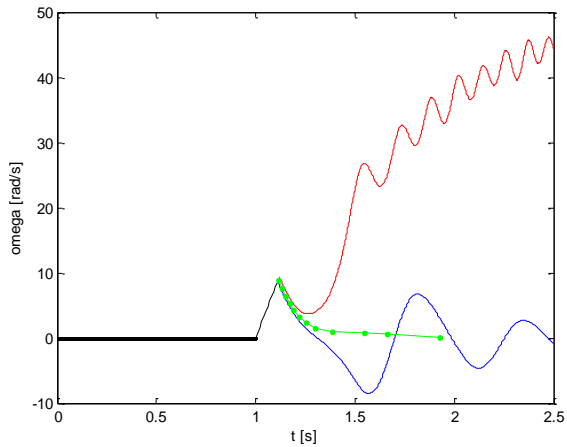
Gambar 4.23. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam *rad/s* terhadap sudut rotor (δ) dalam *rad* pada sistem IEEE-57 dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat dua fasa langsung terjadi di titik C

Pada grafik yang disajikan pada Gambar 4.21 – Gambar 4.23 dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem. Nilai CCT menggunakan *critical trajectory* adalah 0,1134 sedangkan apabila menggunakan *Time Domain Simulation* 0,11-0,12. Pada gambar 4.23 dapat kita amati perubahan dari kecepatan sudut rotor terhadap domain sudut rotor, pada grafik tersebut dapat kita apabila sistem mengalami percepatan maka sudut dari rotor generator bertambah semakin besar dan dapat menyebabkan lepas dari sinkronisasi untuk sistem yang terinterkoneksi sedangkan pada garis biru sistem kembali karena tidak mengalami perubahan kecepatan sudut rotor dan sistem kembali pada kondisi stabil. Pada grafik berwarna hijau (lintasan kritis) digambarkan berawal dari *on-fault trajectory* sampai dengan *end point*, dalam penelitian ini *end point* dari sistem didapatkan dari nilai CUEP (*Controlling Unstable Equilibrium Point*). Berdasarkan data dan grafik di atas dapat disimpulkan bahwa metode *Energy Function* untuk menentukan lintasan kritis sangat akurat dalam mendapatkan nilai CCT. Grafik yang lain akibat sistem mengalami gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah dapat dilihat pada lampiran.

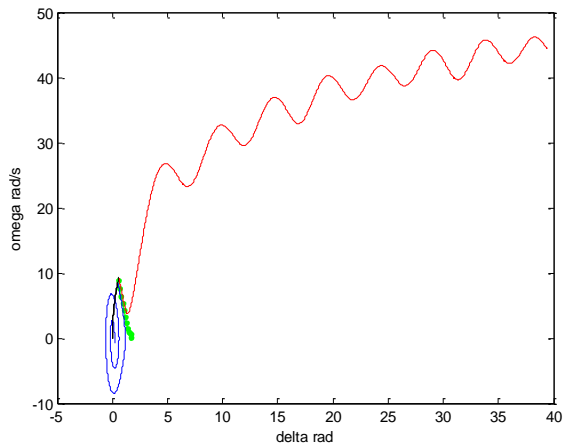
d. Gangguan hubung singkat 3 fasa



Gambar 4.24. Grafik karakteristik sudut rotor (δ) dalam rad terhadap waktu (s) pada sistem IEEE-57 dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat tiga fasa terjadi di titik D



Gambar 4.25. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap waktu (s) pada sistem IEEE-57 dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat tiga fasa terjadi di titik D



Gambar 4.26. Grafik karakteristik kecepatan sudut rotor (ω) dalam rad/s terhadap sudut rotor (δ) dalam rad pada sistem IEEE-57 dengan *damping* bila mengalami gangguan hubung singkat tiga fasa ke tanah terjadi di titik D

Pada grafik yang disajikan pada Gambar 4.24 – Gambar 4.26 dapat diamati perbedaan kondisi stabil dan tidak stabil dari sistem. Nilai CCT menggunakan *critical trajectory* adalah 0,1128 sedangkan apabila menggunakan *Time Domain Simulation* 0,11-0,12. Pada kedua simulasi di atas juga dapat dilihat bahwa metode *critical trajectory* lebih cepat daripada *Time Domain Simulation* mencapai hampir 20 kali lipat. Pada gambar 4.26 dapat kita amati perubahan dari kecepatan sudut rotor terhadap domain sudut rotor, pada grafik tersebut dapat kita apabila sistem mengalami percepatan maka sudut dari rotor generator bertambah semakin besar dan dapat menyebabkan lepas dari sinkronisasi untuk sistem yang terinterkoneksi sedangkan pada garis biru sistem kembali karena tidak mengalami perubahan kecepatan sudut rotor dan sistem kembali pada kondisi stabil. Pada grafik berwarna hijau (lintasan kritis) digambarkan berawal dari *on-fault trajectory* sampai dengan *end point*, dalam penelitian ini *end point* dari sistem didapatkan dari nilai CUEP (*Controlling Unstable Equilibrium Point*). Berdasarkan data dan grafik di atas dapat disimpulkan bahwa metode *Energy Function* untuk menentukan lintasan kritis sangat akurat dalam mendapatkan nilai CCT. Grafik yang lain akibat sistem mengalami gangguan hubung singkat dua fasa ke tanah dapat dilihat pada lampiran.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, “*Definition and Classification of Power System Stability*” *IEEE Transactions on Power system* , vol. 19, no. 2, may 2004.
- [2] Chiang, Hsiao-Dong, *Direct Methods for Stability Analysis of Electric Power Systems*, Canada: John Wiles & Sons, Inc, 2011
- [3] Kundur, P., “*Power System Stability and Control*”, McGraw-Hill, Inc, 1994.
- [4] Hakim, M.F., ”Analisis Stabilitas Transient Menggunakan Metode Trajectory Kritis pada Sistem Multi Mesin dengan Mempertimbangkan AVR dan Governor ”. Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2015.
- [5] Grainger, J.J., Stevenson, W.D., *Power System Analysis*, New York: McGraw-Hill, Inc, 1994
- [6] Roger T.T., Vijay Vittal, Wolfgang Kliemann, “*An Improved Technique to Determine the Controlling Unstable Equilibrium Point in a Power System*” *IEEE Transactions on Circuit and Systems*, Vol. 43, No.4, April 1996
- [7] Athay T., R. Podmore, S. Virmani, “*A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability*,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-98, No.2, March/April 1979
- [8] N. Yorino, A. Priyadi, Hironori K., dan M. Takeshita, “*A New Method for Obtaining Critical Clearing Time for Transient Stability*,” *IEEE Transactions On Power Systems*, Vol. 25, No. 3, August 2010.
- [9] J. Chapman, Stephen, *Electric Machinery Fundamentals Fourth Edition*, New York: McGraw-Hill, Inc, 2005.

- [10] K. Ariyo, Funso, *Electrical Network Reduction for Load Flow and Short-Circuit Calculations using PowerFactory Software*, Electrical and Electronic Engineering, Vol. 3 No. 1, 2013, pp. 1-7. doi: 10.5923/j.eee.20130301.01.
- [11] Ronald G. Harley, Elham B. Makram, Edwin G. duran, *The Effects of Unbalanced Network and Unbalanced Faults on Induction Motor Transien Stability*, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol 3, No 2, Juni 1988
- [12] IEEE Power and Energy Society, *Voltage Stability Assessment: Concept, Practices and Tools*.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang didapatkan dari simulasi dan analisis pada tugas akhir ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode *energy function* merupakan metode langsung yang dapat menentukan *Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP)*, digunakan untuk menentukan *end point* pada lintasan kritis (*critical trajectory*) sehingga dapat memberikan penilaian terhadap sebuah sistem multimesin yang direpresentasikan dengan *CCT (Critical Clearing Time)*.
2. Metode perhitungan *critical clearing time (cct)* dengan menggunakan *Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP)* tidak memerlukan waktu yang cukup lama seperti pada metode numerikal. Selisih waktu rata-rata untuk sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson adalah 116,1372 detik
3. Metode perhitungan *critical clearing time (cct)* dengan menggunakan *Controlling Unstable Equilibrium Point (CUEP)* cukup akurat dengan rata – rata error 0,03 % . Hal ini dibuktikan dengan beberapa hasil simulasi sistem 3 generator 9 bus Fouad Anderson dan IEEE57, perhitungan *CCT(Critical Clearing Time)* sama dengan metode *Time Domain Simulation*.
4. Metode *critical trajectory* untuk mendapatkan *critical clearing time (cct)* dengan mempertimbangkan gangguan hubung singkat tidak seimbang juga dapat diaplikasikan untuk gangguan hubung singkat tiga fasa.
5. Pada metode *CUEP (Controlling Unstable Equilibrium Point)*, saat terjadi gangguan dapat mengetahui besar energi setiap generator sehingga dapat dilakukan analisa generator yang mempunyai dampak paling besar saat gangguan.

5.2 Saran

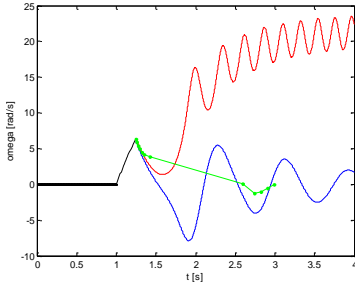
Saran yang dapat diberikan untuk perbaikan dan pengembangan simulasi ini adalah sebagai berikut :

1. Perlu dikembangkan agar metode *critical trajectory* dengan gangguan hubung singkat tidak seimbang yang dapat bekerja pada sistem yang terhubung pada *infinite bus*. Karena dalam penelitian ini lebih fokus pada pengembangan metode *CUEP (Controlling Unstable Equilibrium Point)* dan generator kritis.

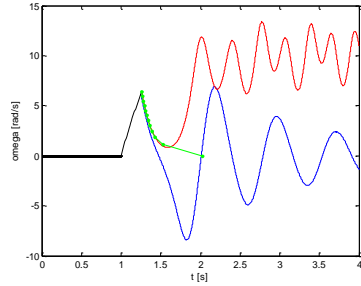
2. Perlu dilakukan simulasi pada sistem multimesin yang lebih banyak untuk membuktikan keakuratan metode dalam memberikan penilaian terhadap kestabilan sistem multimesin yang *universal*. Karena pada beberapa kasus, sistem dengan gangguan hubung sigkat *unbalanced* ini tidak dapat diterapkan pada plan yg besar.
3. Perlu dilakukan perbaikan pada program *power flow* agar dapat membaca parameter-parameter secara *real*.

LAMPIRAN

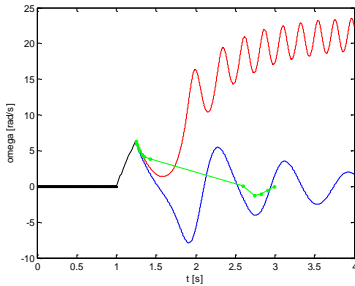
I. Grafik Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad Anderson Akibat Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah antara Kecepatan Sudut Rotor[ω] terhadap waktu [t]



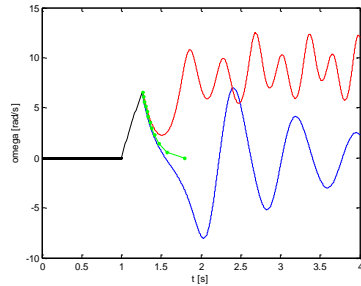
Gambar L.1. Gangguan di titik B



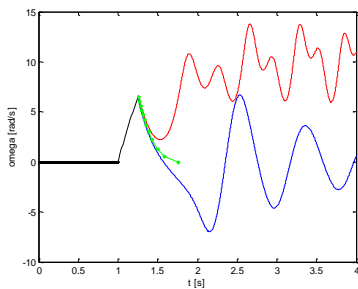
Gambar L.2. Gangguan di titik C



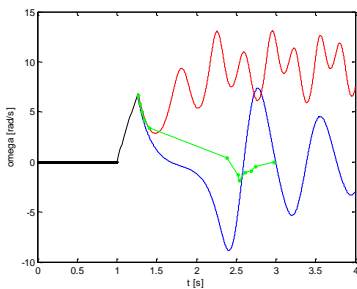
Gambar L.3. Gangguan di titik D



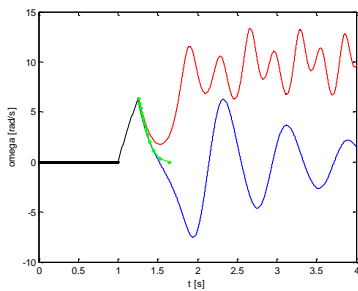
Gambar L.4. Gangguan di titik E



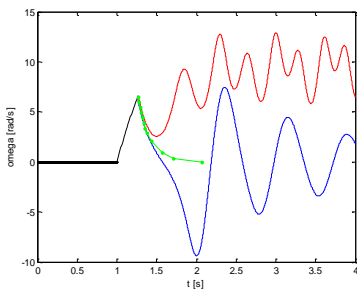
Gambar L.5. Gangguan di titik F



Gambar L.6. Gangguan di titik G

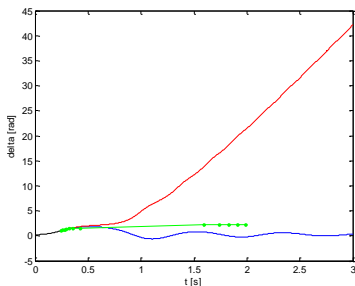


Gambar L.7. Gangguan di titik H

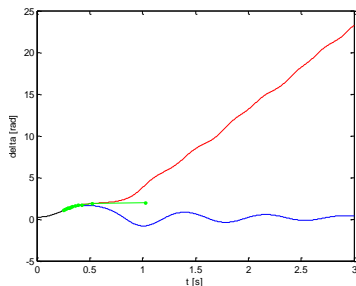


Gambar L.8. Gangguan di titik I

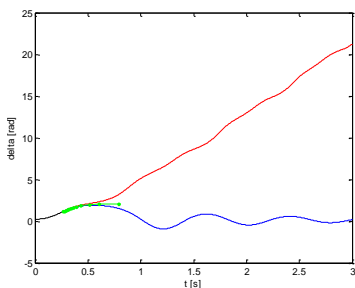
II. Grafik Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad Anderson Akibat Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah antara Sudut Rotor[δ] terhadap waktu [t]



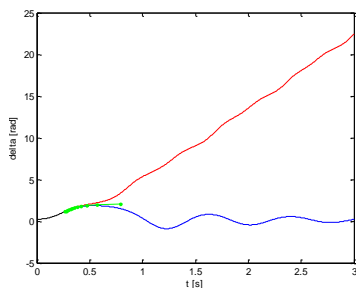
Gambar L.9. Gangguan di titik B



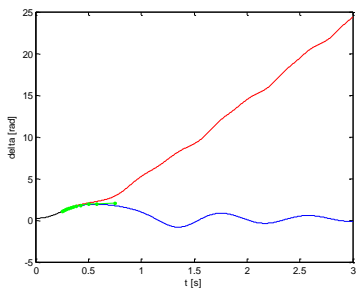
Gambar L.10. Gangguan di titik C



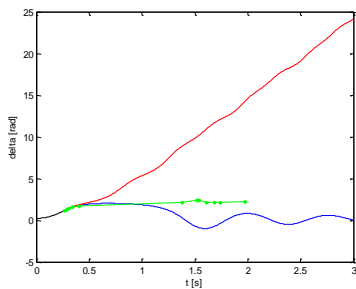
Gambar L.11. Gangguan di titik D



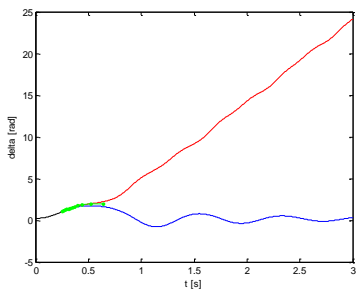
Gambar L.12. Gangguan di titik E



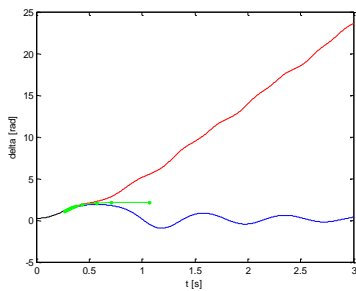
Gambar L.13. Gangguan di titik F



Gambar L.14. Gangguan di titik G

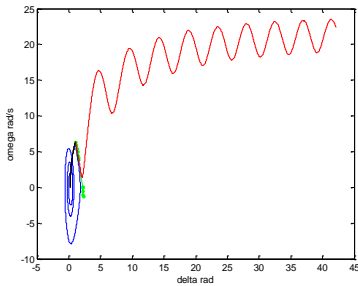


Gambar L.15. Gangguan di titik H

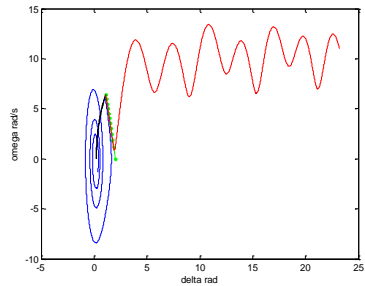


Gambar L.16. Gangguan di titik I

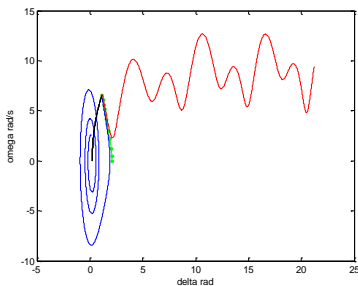
III. Grafik Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad Anderson Akibat Hubung Singkat Satu Fasa Ke Tanah antara Sudut Rotor $[\delta]$ terhadap Kecepatan Sudut Rotor $[\omega]$



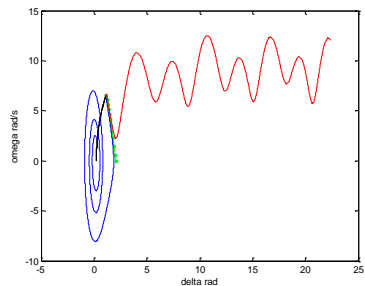
Gambar L.17. Gangguan di titik B



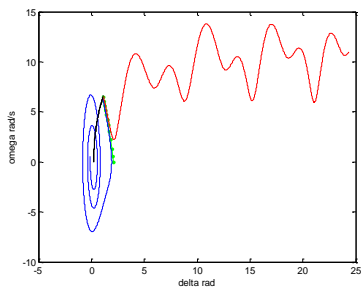
Gambar L.18. Gangguan di titik C



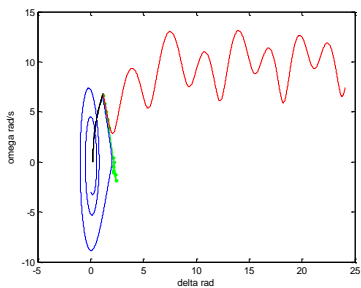
Gambar L.19. Gangguan di titik D



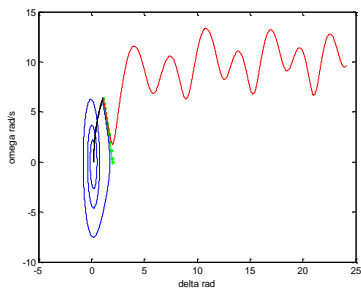
Gambar L.20. Gangguan di titik E



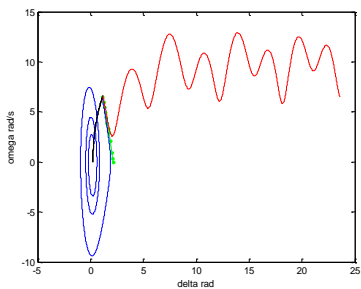
Gambar L.21. Gangguan di titik F



Gambar L.22. Gangguan di titik G

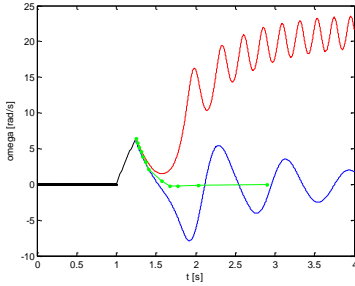


Gambar L.23. Gangguan di titik H

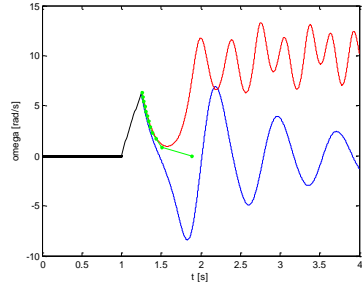


Gambar L.24. Gangguan di titik I

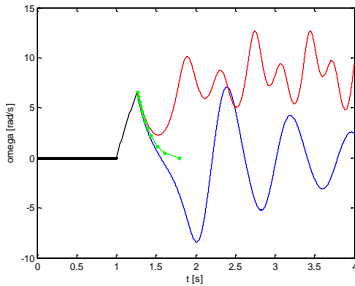
IV. Grafik Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad Anderson Akibat Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah antara Kecepatan Sudut Rotor[ω] terhadap waktu [t]



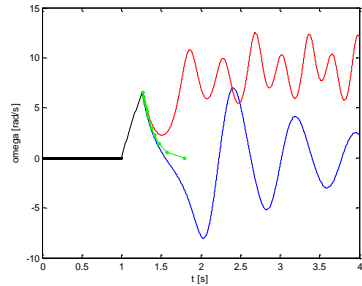
Gambar L.25. Gangguan di titik A



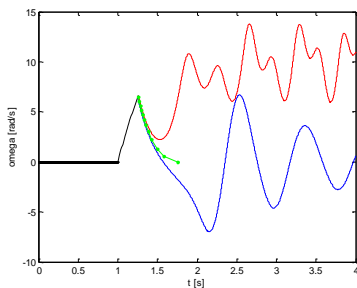
Gambar L.26. Gangguan di titik C



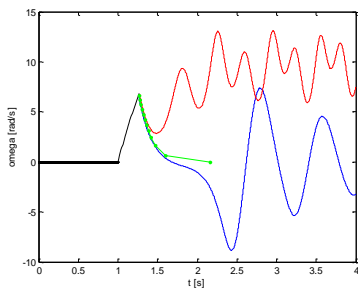
Gambar L.27. Gangguan di titik D



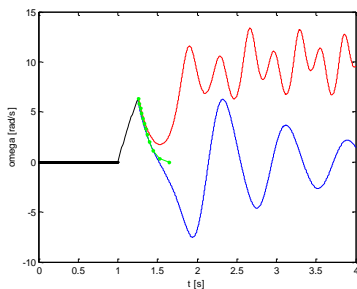
Gambar L.28. Gangguan di titik E



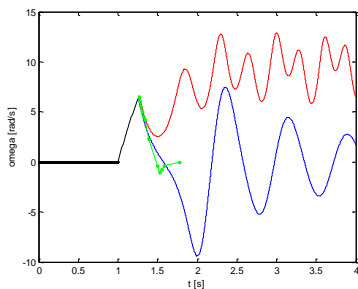
Gambar L.29. Gangguan di titik F



Gambar L.30. Gangguan di titik G

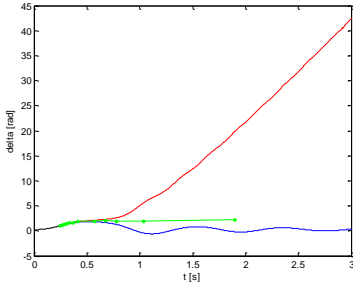


Gambar L.31. Gangguan di titik H

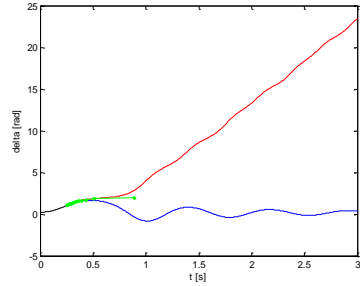


Gambar L.32. Gangguan di titik I

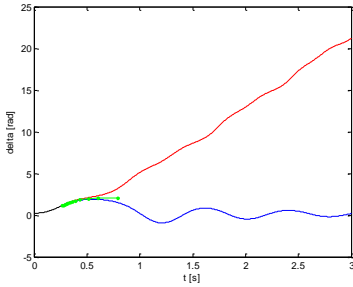
V. Grafik Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad Anderson Akibat Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah antara Sudut Rotor[δ] terhadap waktu [t]



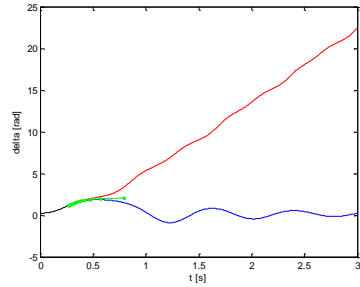
Gambar L.33. Gangguan di titik A



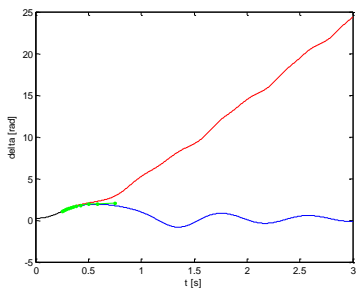
Gambar L.34. Gangguan di titik C



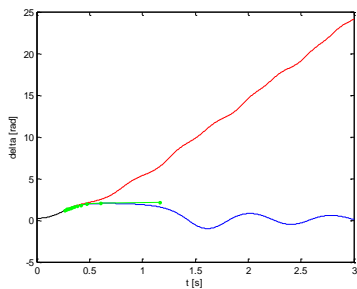
Gambar L.35. Gangguan di titik D



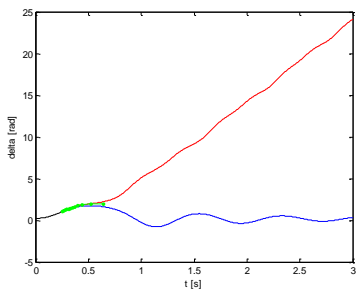
Gambar L.36. Gangguan di titik E



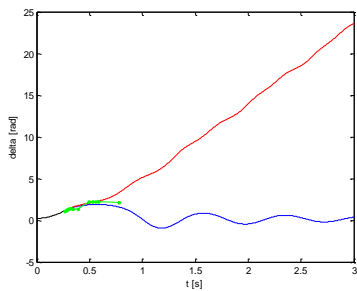
Gambar L.37. Gangguan di titik F



Gambar L.38. Gangguan di titik G

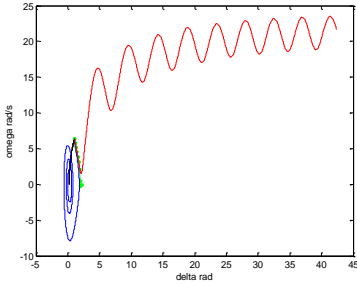


Gambar L.39. Gangguan di titik H

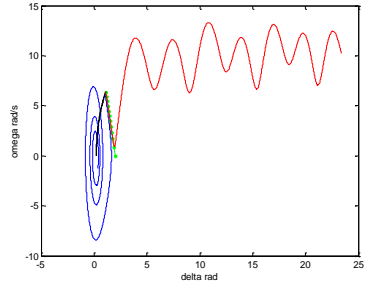


Gambar L.40. Gangguan di titik I

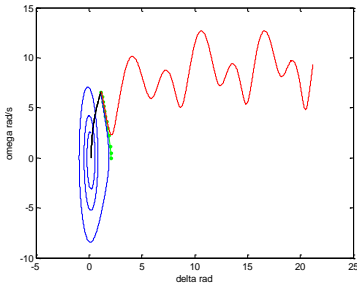
VI. Grafik Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad Anderson Akibat Hubung Singkat Dua Fasa Ke Tanah antara Sudut Rotor[δ] terhadap Kecepatan Sudut Rotor [ω]



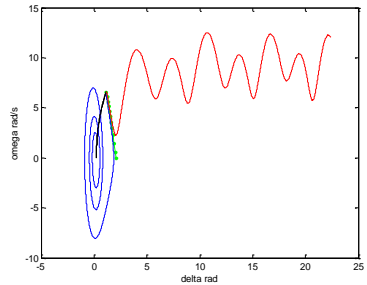
Gambar L.41. Gangguan di titik A



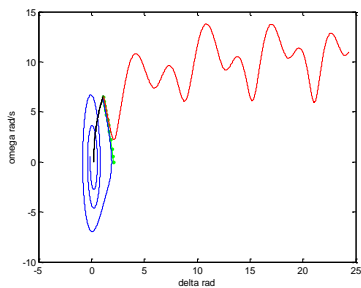
Gambar L.42. Gangguan di titik C



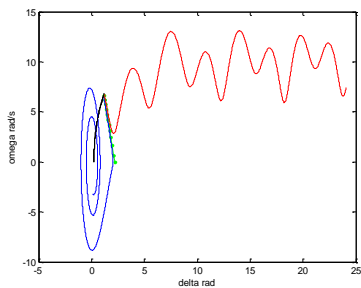
Gambar L.43. Gangguan di titik D



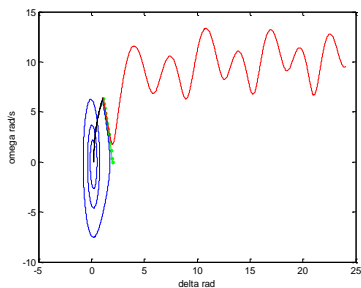
Gambar L.44. Gangguan di titik E



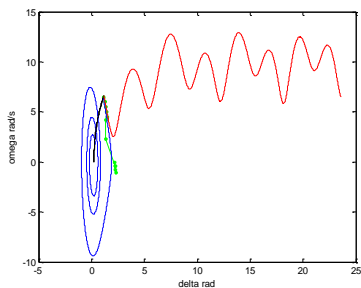
Gambar L.45. Gangguan di titik F



Gambar L.46. Gangguan di titik G

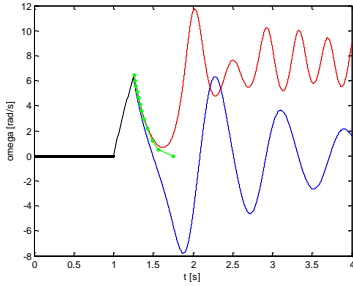


Gambar L.47. Gangguan di titik H

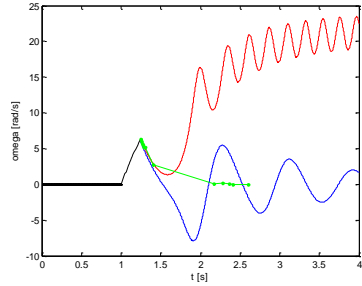


Gambar L.48. Gangguan di titik I

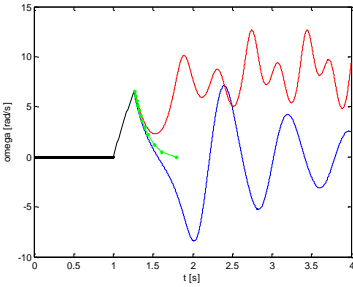
VII. Grafik Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad Anderson Akibat Hubung Singkat Dua Fasa Langsung antara Kecepatan Sudut Rotor[ω] terhadap waktu [t]



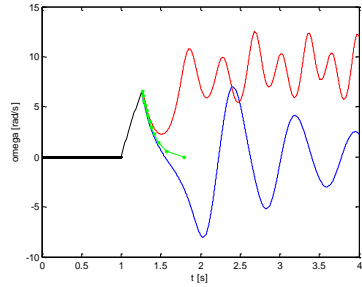
Gambar L.49. Gangguan di titik A



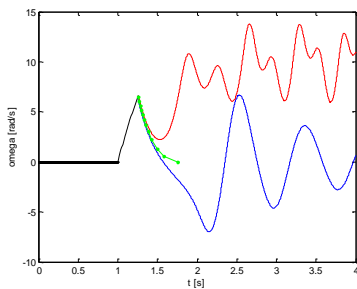
Gambar L.50. Gangguan di titik B



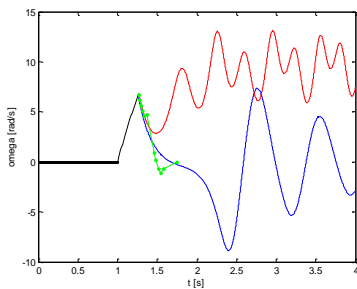
Gambar L.51. Gangguan di titik D



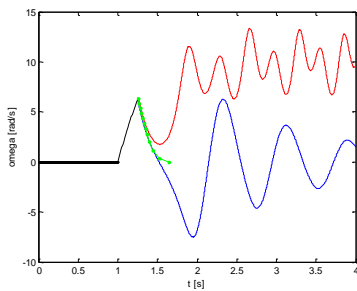
Gambar L.52. Gangguan di titik E



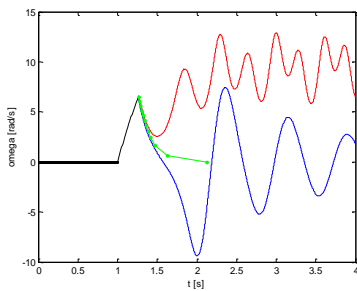
Gambar L.53. Gangguan di titik F



Gambar L.54. Gangguan di titik G

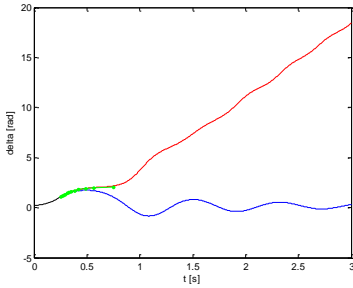


Gambar L.55. Gangguan di titik H

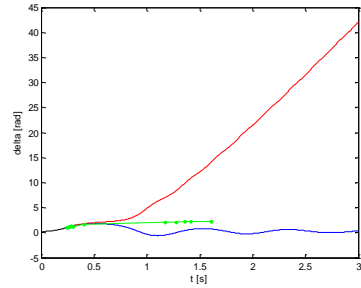


Gambar L.56. Gangguan di titik I

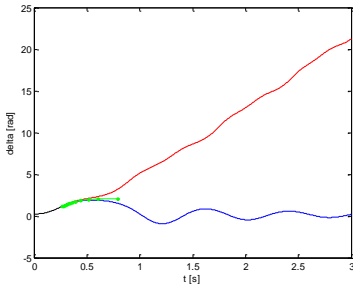
VIII. Grafik Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad Anderson Akibat Hubung Singkat Dua Fasa Langsung antara Sudut Rotor[δ] terhadap waktu [t]



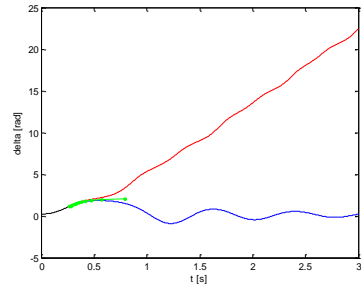
Gambar L.57. Gangguan di titik A



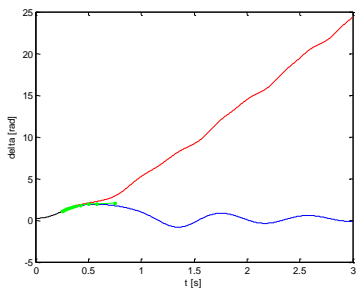
Gambar L.58. Gangguan di titik B



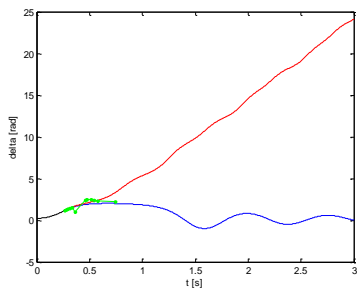
Gambar L.59. Gangguan di titik D



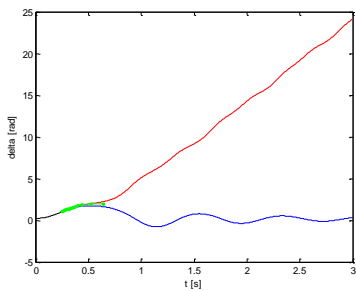
Gambar L.60. Gangguan di titik E



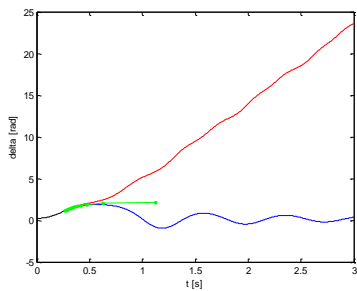
Gambar L.61. Gangguan di titik F



Gambar L.62. Gangguan di titik G

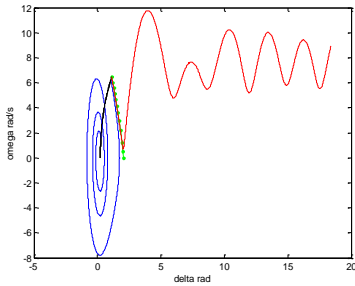


Gambar L.63. Gangguan di titik H

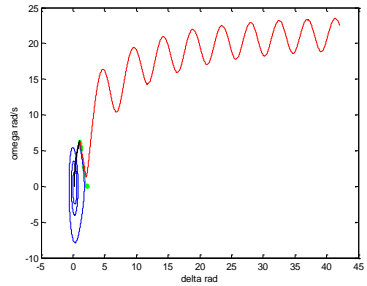


Gambar L.64. Gangguan di titik I

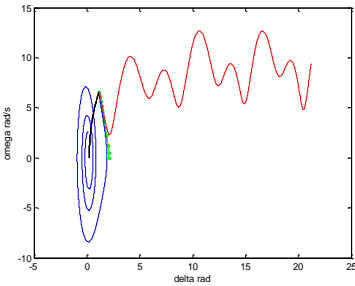
IX. Grafik Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad Anderson Akibat Hubung Singkat Dua Fasa Langsung antara Sudut Rotor[δ] terhadap Kecepatan Sudut Rotor [ω]



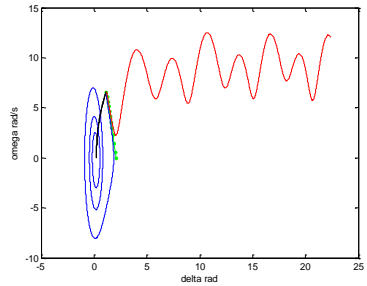
Gambar L.65. Gangguan di titik A



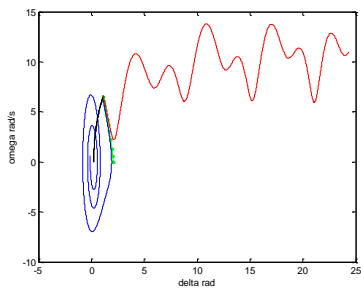
Gambar L.66. Gangguan di titik B



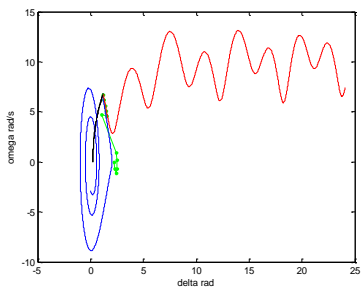
Gambar L.67. Gangguan di titik D



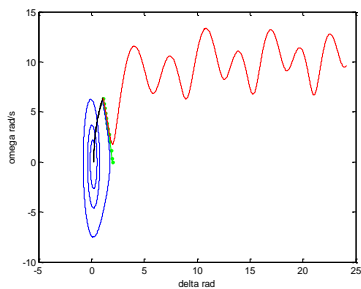
Gambar L.68. Gangguan di titik E



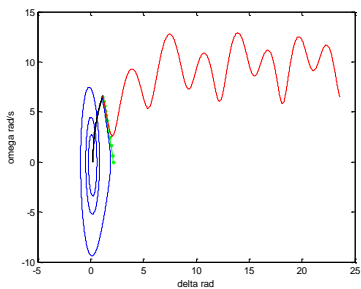
Gambar L.69. Gangguan di titik F



Gambar L.70. Gangguan di titik G

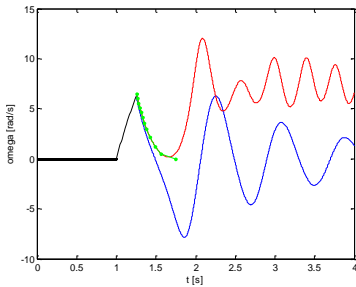


Gambar L.71. Gangguan di titik H

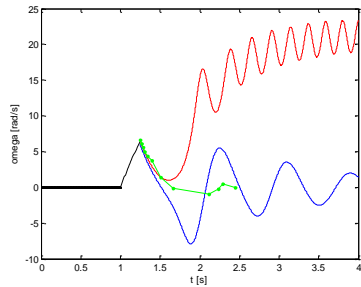


Gambar L.72. Gangguan di titik I

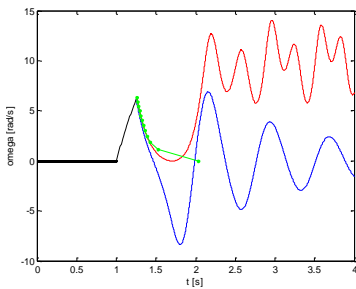
X. Grafik Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad Anderson Akibat Hubung Singkat Tiga Fasa antara Kecepatan Sudut Rotor[ω] terhadap waktu [t]



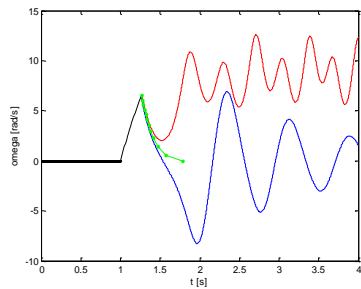
Gambar L.73. Gangguan di titik A



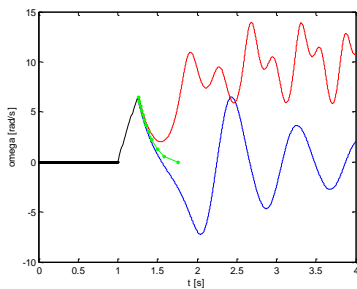
Gambar L.74. Gangguan di titik B



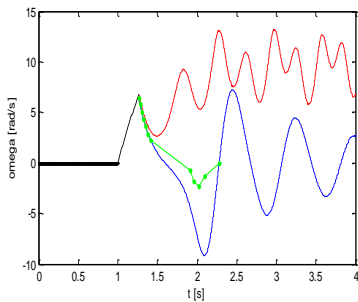
Gambar L.75. Gangguan di titik C



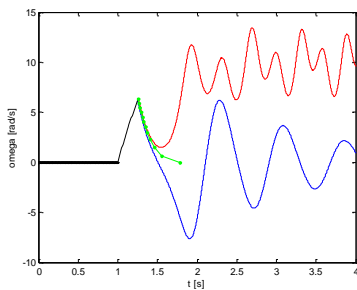
Gambar L.76. Gangguan di titik E



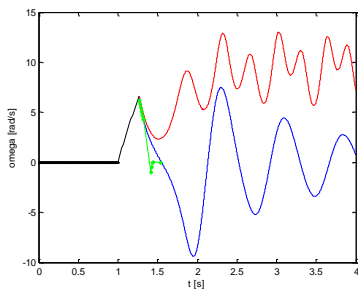
Gambar L.77. Gangguan di titik F



Gambar L.78. Gangguan di titik G

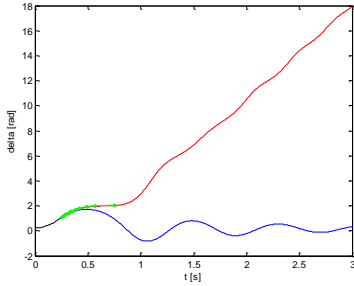


Gambar L.79. Gangguan di titik H

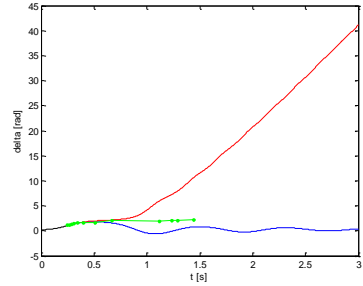


Gambar L.80. Gangguan di titik I

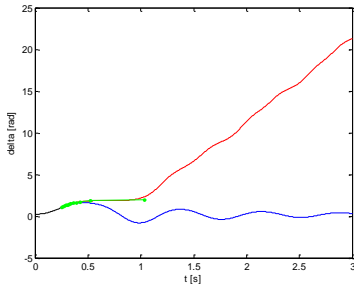
XI. Grafik Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad Anderson Akibat Hubung Singkat Tigas Fasa antara Sudut Rotor[δ] terhadap waktu [t]



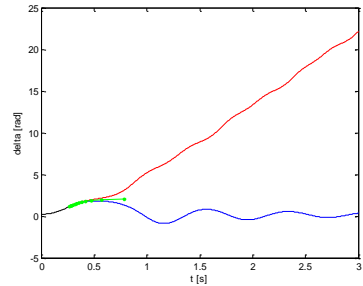
Gambar L.81. Gangguan di titik A



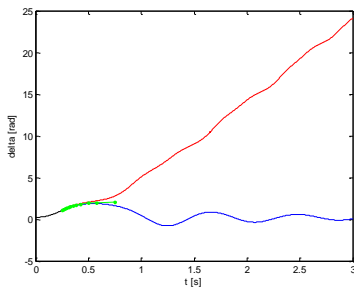
Gambar L.82. Gangguan di titik B



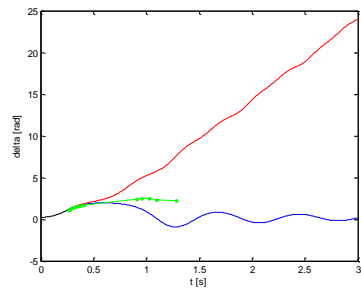
Gambar L.83. Gangguan di titik C



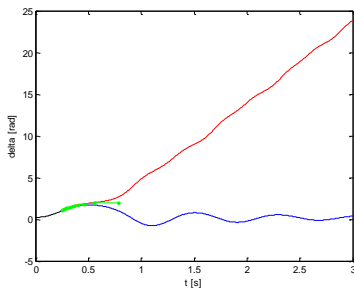
Gambar L.84. Gangguan di titik E



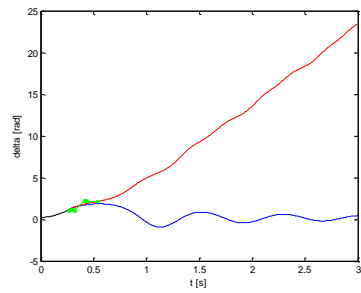
Gambar L.85. Gangguan di titik F



Gambar L.86. Gangguan di titik G

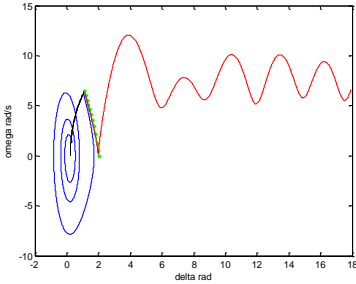


Gambar L.87. Gangguan di titik H

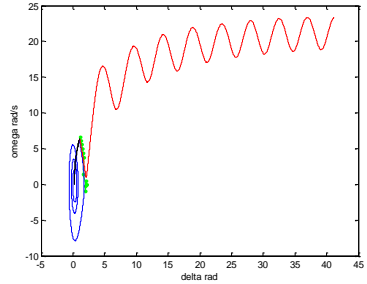


Gambar L.88. Gangguan di titik I

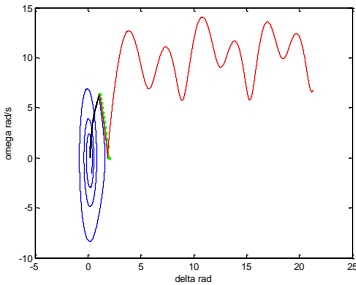
***XII.* Grafik Sistem 3 Generator 9 Bus Fouad Anderson Akibat Hubung Singkat Tiga Fasa antara Sudut Rotor[δ] terhadap Kecepatan Sudut Rotor [ω]**



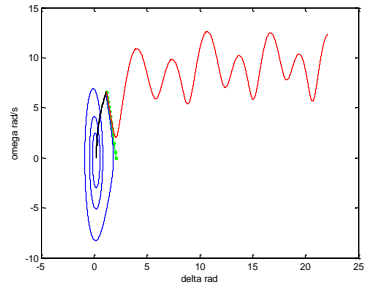
Gambar L.89. Gangguan di titik A



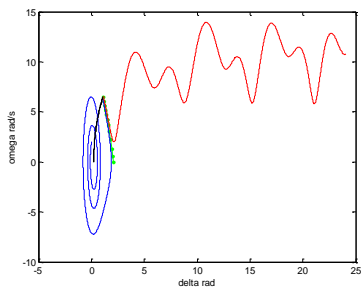
Gambar L.90. Gangguan di titik B



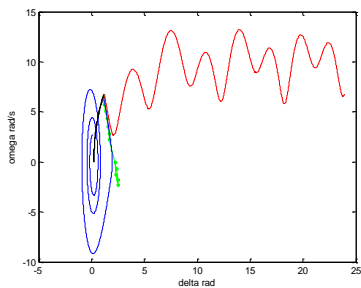
Gambar L.91. Gangguan di titik C



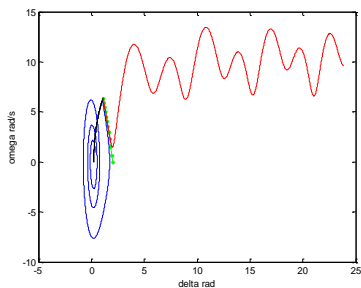
Gambar L.92. Gangguan di titik E



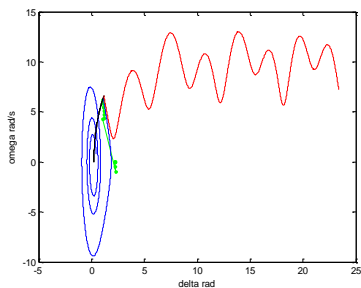
Gambar L.93. Gangguan di titik F



Gambar L.94. Gangguan di titik G

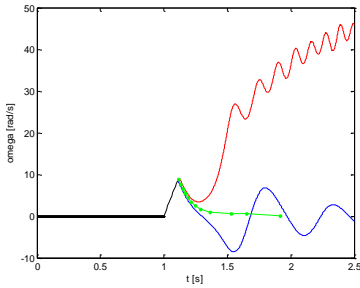


Gambar L.95. Gangguan di titik H

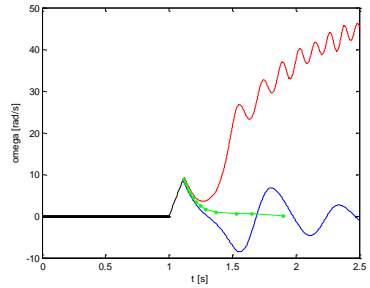


Gambar L.96. Gangguan di titik I

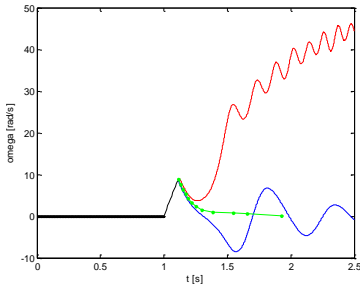
***XIII.* Grafik Sistem IEEE57 7 generator 57 Bus Akibat Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah antara Kecepatan Sudut Rotor[ω] terhadap waktu [t]**



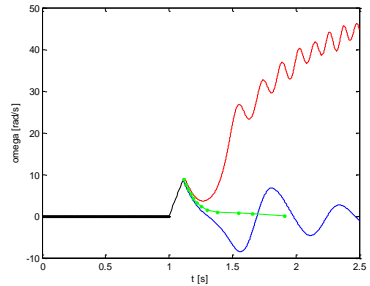
Gambar L.97. Gangguan di titik B



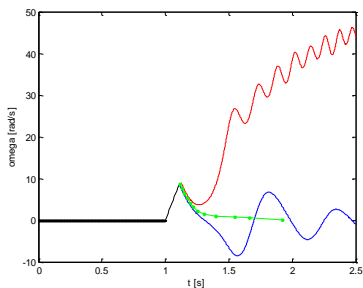
Gambar L.98. Gangguan di titik C



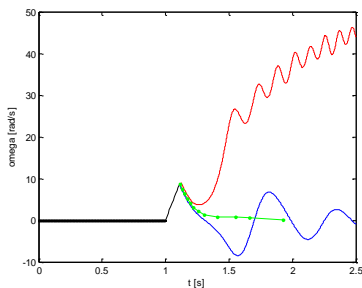
Gambar L.99. Gangguan di titik D



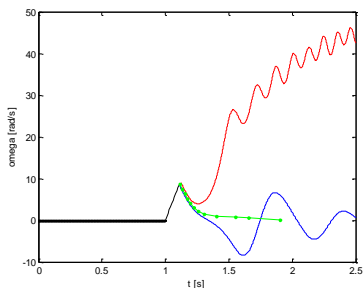
Gambar L.100. Gangguan di titik E



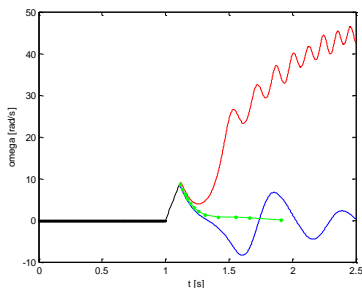
Gambar L.101. Gangguan di titik F



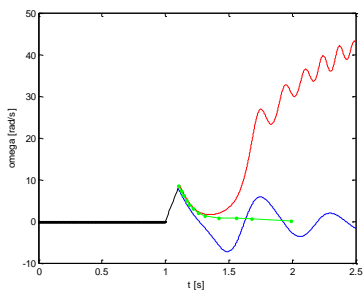
Gambar L.102. Gangguan di titik G



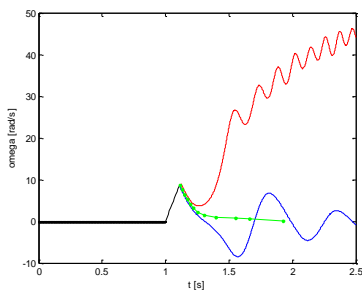
Gambar L.103. Gangguan di titik H



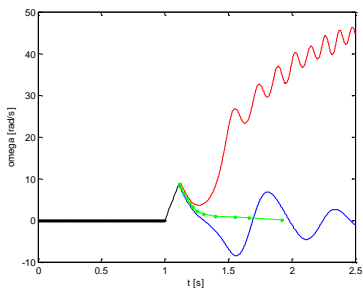
Gambar L.104. Gangguan di titik I



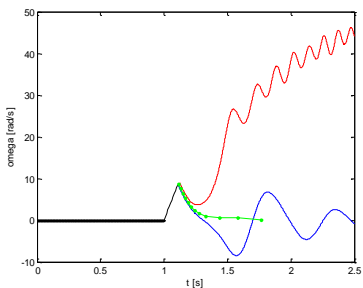
Gambar L.105. Gangguan di titik J



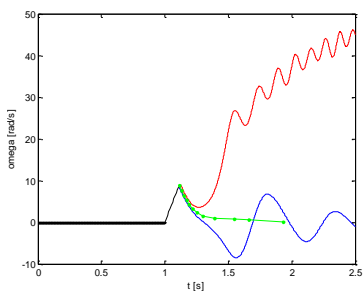
Gambar L.106. Gangguan di titik K



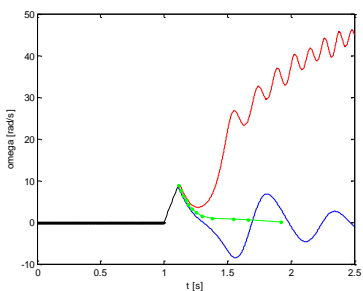
Gambar L.107. Gangguan di titik L



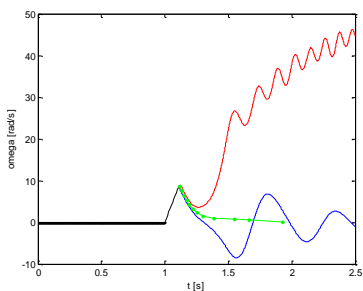
Gambar L.108. Gangguan di titik M



Gambar L.109. Gangguan di titik N

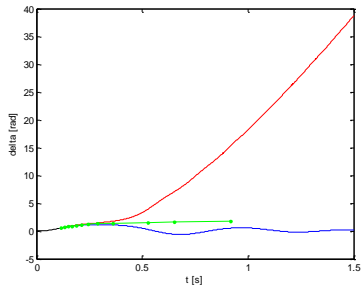


Gambar L.110. Gangguan di titik O

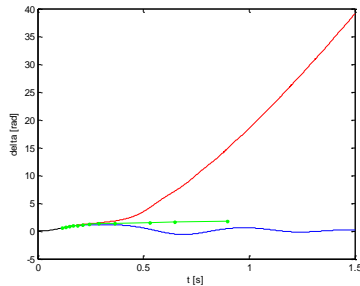


Gambar L.111. Gangguan di titik P

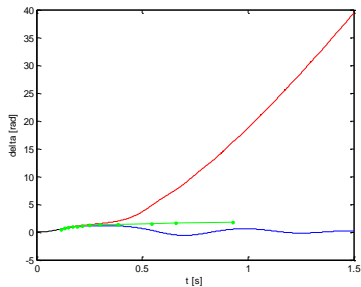
**XIV. Grafik Sistem IEEE57 7 generator 57 Bus Akibat
Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah antara Sudut
Rotor[δ] terhadap waktu [t]**



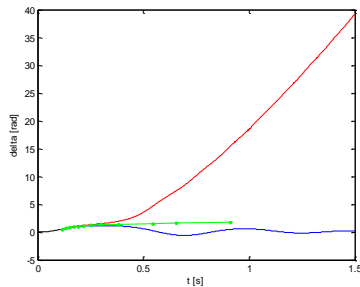
Gambar L.112. Gangguan di titik B



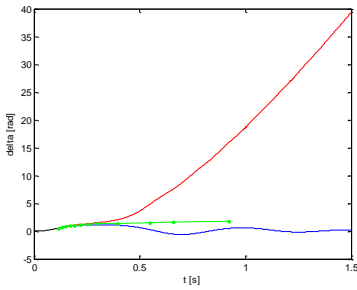
Gambar L.113. Gangguan di titik C



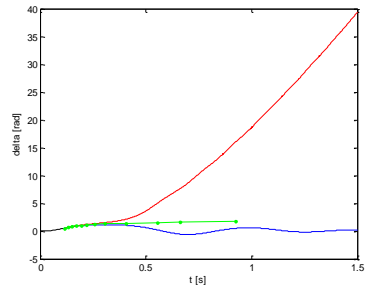
Gambar L.114. Gangguan di titik D



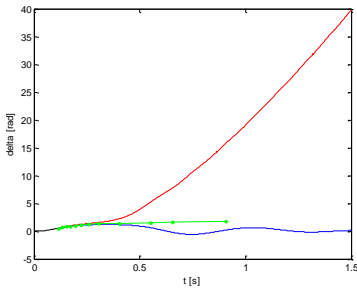
Gambar L.115. Gangguan di titik E



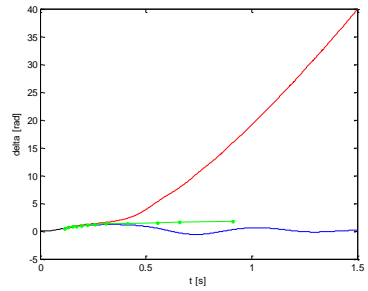
Gambar L.116. Gangguan di titik F



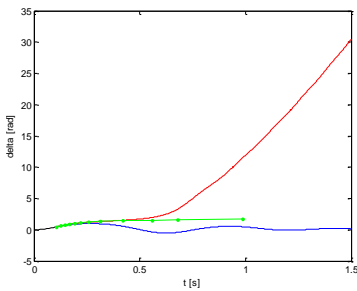
Gambar L.117. Gangguan di titik G



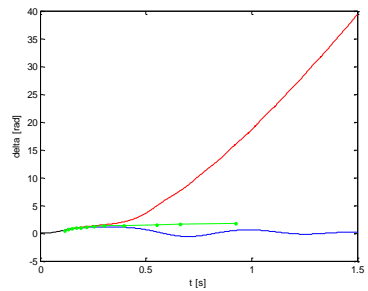
Gambar L.118. Gangguan di titik H



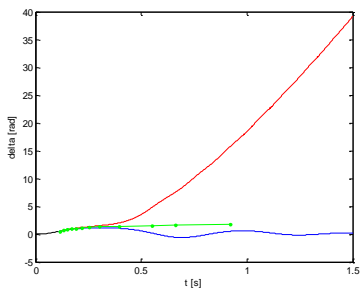
Gambar L.119. Gangguan di titik I



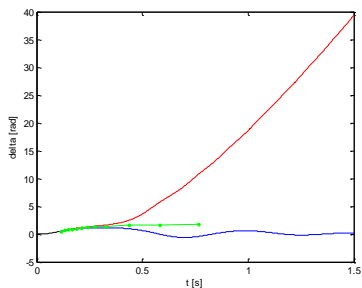
Gambar L.120. Gangguan di titik J



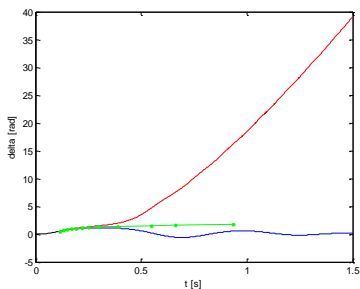
Gambar L.121. Gangguan di titik K



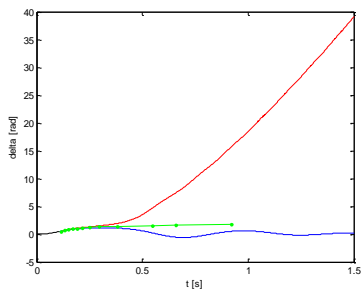
Gambar L.122. Gangguan di titik L



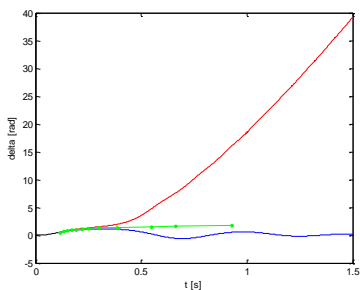
Gambar L.123. Gangguan di titik M



Gambar L.124. Gangguan di titik N

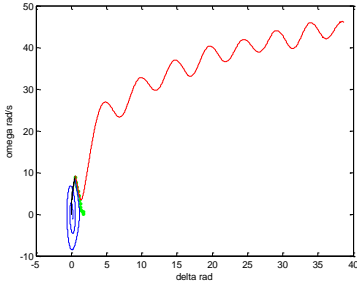


Gambar L.125. Gangguan di titik O

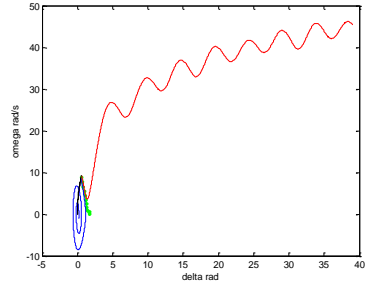


Gambar L.126. Gangguan di titik P

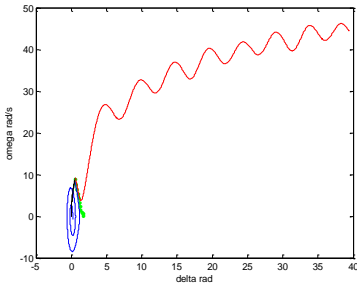
XV. Grafik Sistem IEEE57 7 generator 57 Bus Akibat Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah antara Kecepatan Sudut Rotor $[\omega]$ terhadap Sudut Rotor $[\delta]$



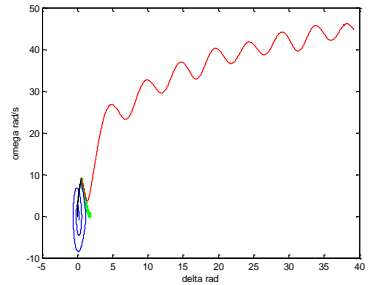
Gambar L.127. Gangguan di titik B



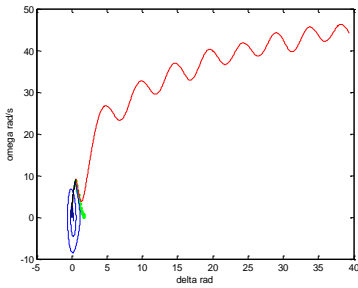
Gambar L.128. Gangguan di titik C



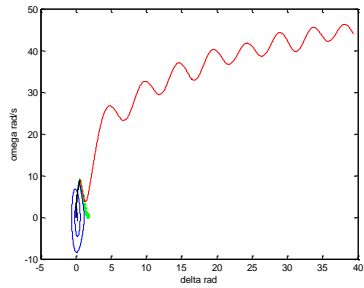
Gambar L.129. Gangguan di titik D



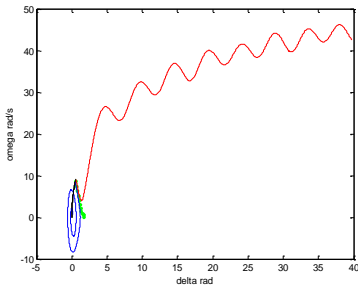
Gambar L.130. Gangguan di titik E



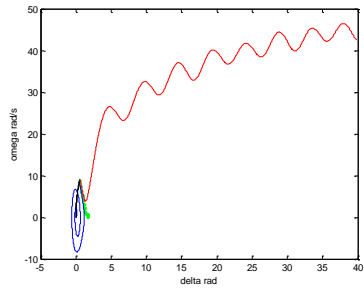
Gambar L.131. Gangguan di titik F



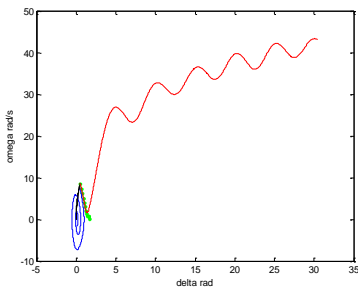
Gambar L.132. Gangguan di titik G



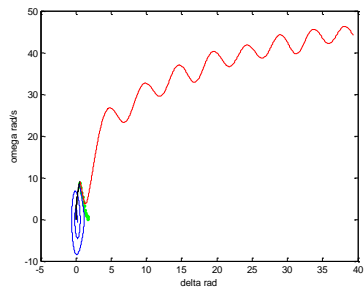
Gambar L.133. Gangguan di titik H



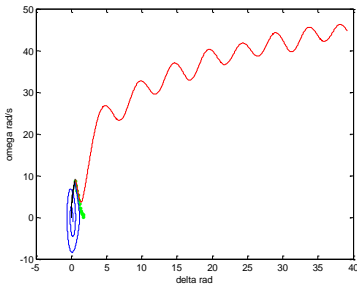
Gambar L.134. Gangguan di titik I



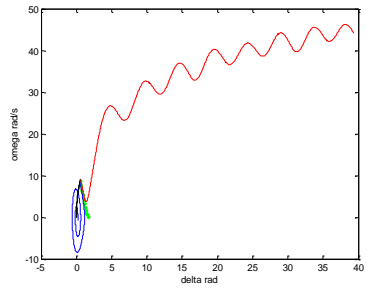
Gambar L.135. Gangguan di titik J



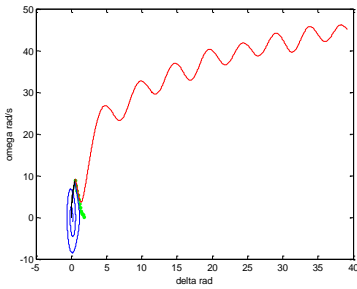
Gambar L.136. Gangguan di titik K



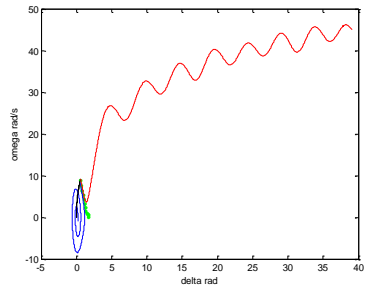
Gambar L.137. Gangguan di titik L



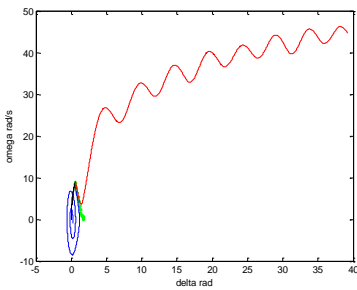
Gambar L.138. Gangguan di titik M



Gambar L.139. Gangguan di titik N

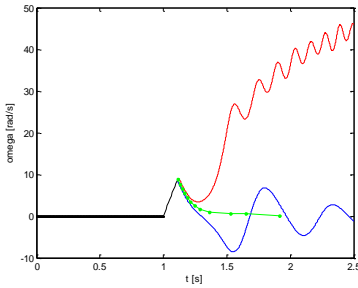


Gambar L.140. Gangguan di titik O

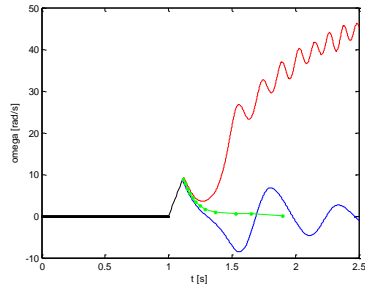


Gambar L.141. Gangguan di titik P

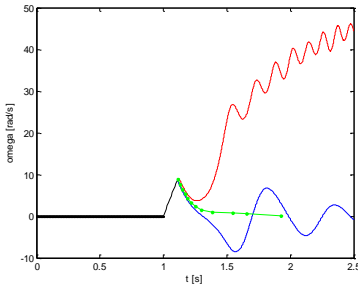
XVI. Grafik Sistem IEEE57 7 generator 57 Bus Akibat Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah antara Kecepatan Sudut Rotor[ω] terhadap waktu [t]



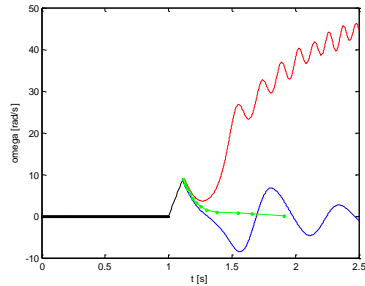
Gambar L.142. Gangguan di titik A



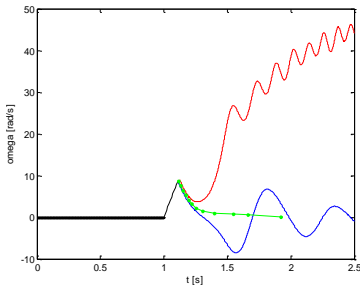
Gambar L.143. Gangguan di titik C



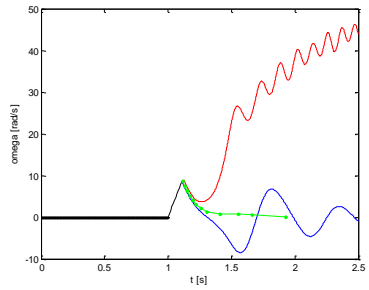
Gambar L.144. Gangguan di titik D



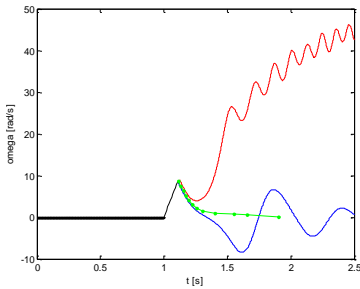
Gambar L.145. Gangguan di titik E



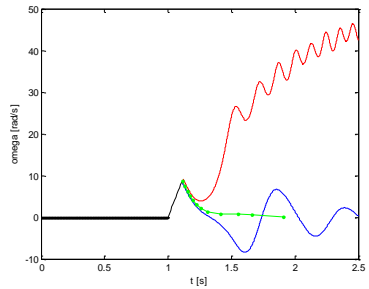
Gambar L.146. Gangguan di titik F



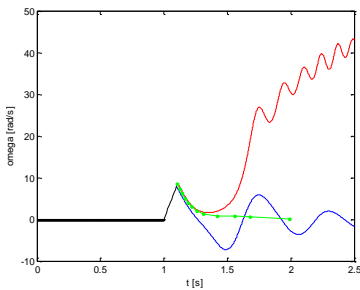
Gambar L.147. Gangguan di titik G



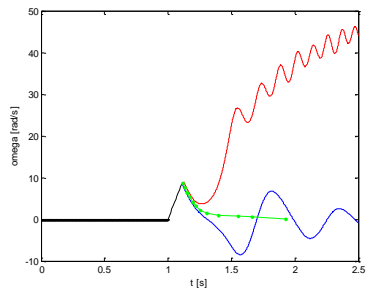
Gambar L.148. Gangguan di titik H



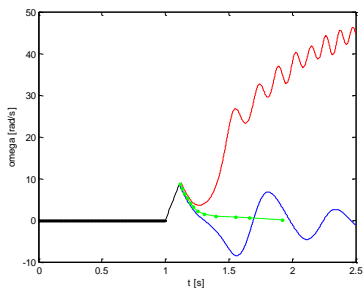
Gambar L.149. Gangguan di titik I



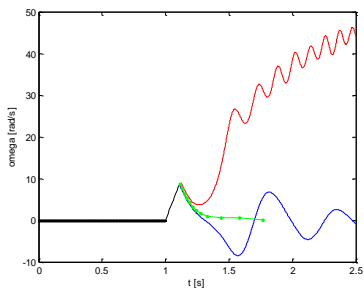
Gambar L.150. Gangguan di titik J



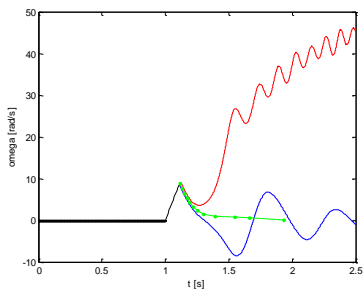
Gambar L.151. Gangguan di titik K



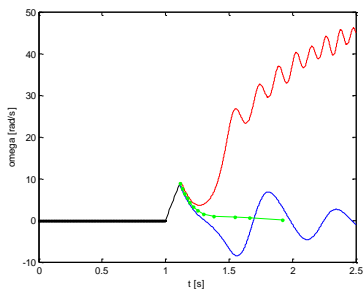
Gambar L.152. Gangguan di titik L



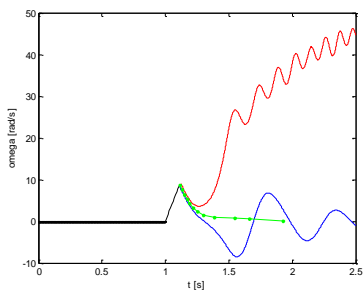
Gambar L.153. Gangguan di titik M



Gambar L.154. Gangguan di titik N

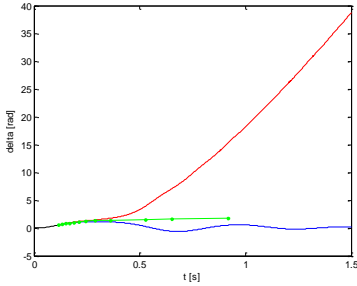


Gambar L.155. Gangguan di titik O

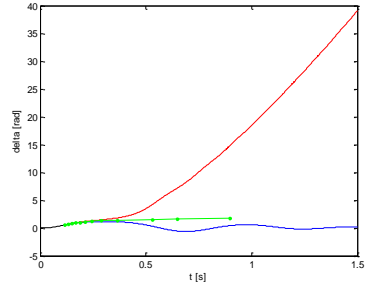


Gambar L.156. Gangguan di titik P

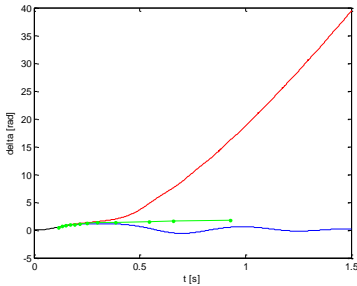
XVII. Grafik Sistem IEEE57 7 generator 57 Bus Akibat Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah antara Sudut Rotor[δ] terhadap waktu [t]



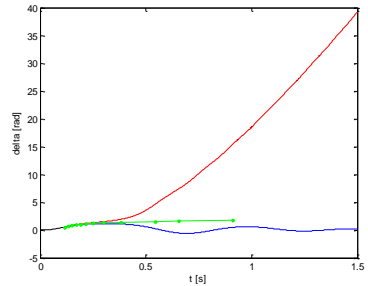
Gambar L.157. Gangguan di titik A



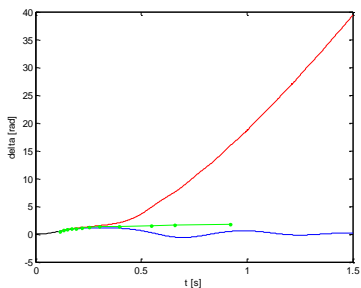
Gambar L.158. Gangguan di titik C



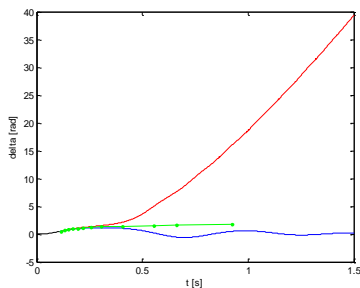
Gambar L.159. Gangguan di titik D



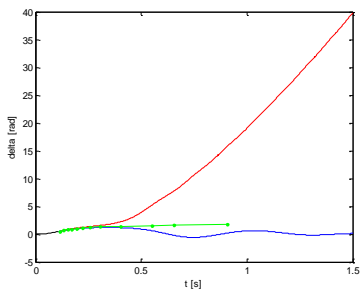
Gambar L.160. Gangguan di titik E



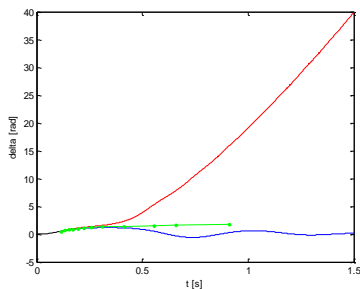
Gambar L.161. Gangguan di titik F



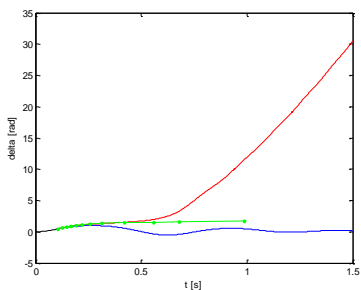
Gambar L.162. Gangguan di titik G



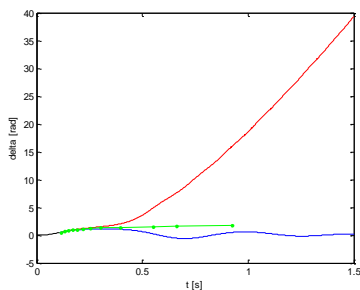
Gambar L.163. Gangguan di titik H



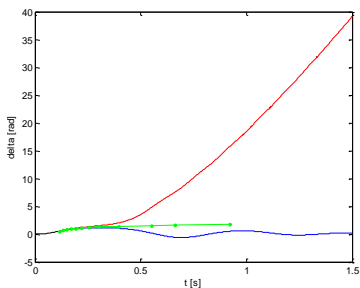
Gambar L.164. Gangguan di titik I



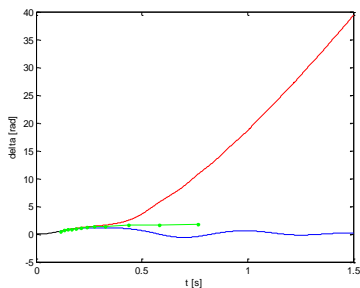
Gambar L.165. Gangguan di titik J



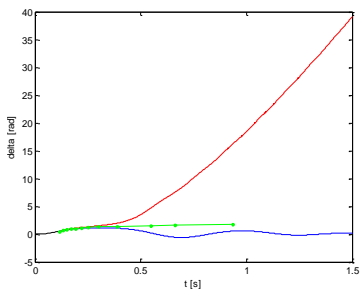
Gambar L.166. Gangguan di titik K



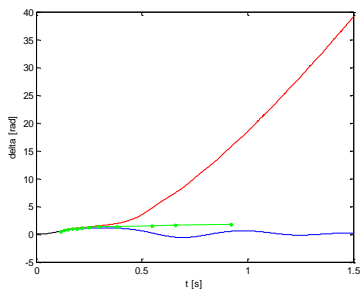
Gambar L.167. Gangguan di titik L



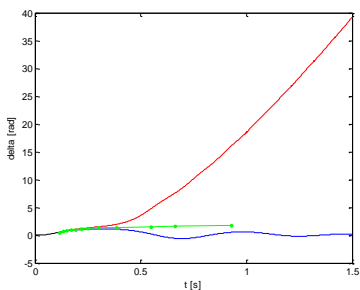
Gambar L.167. Gangguan di titik M



Gambar L.169. Gangguan di titik N

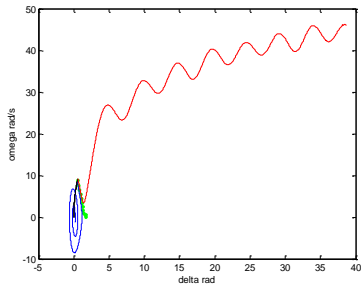


Gambar L.170. Gangguan di titik O

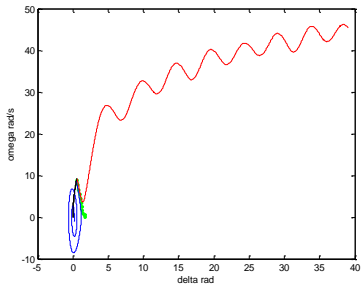


Gambar L.171. Gangguan di titik P

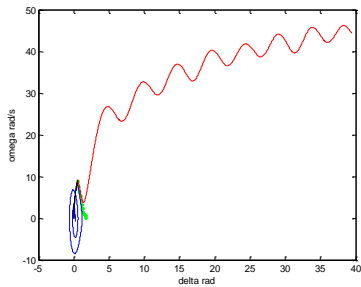
XVIII. Grafik Sistem IEEE57 7 generator 57 Bus Akibat Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah antara Kecepatan Sudut Rotor[ω] terhadap Sudut Rotor [δ]



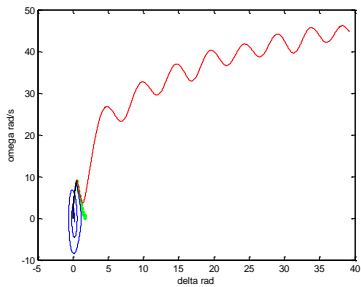
Gambar L.172. Gangguan di titik A



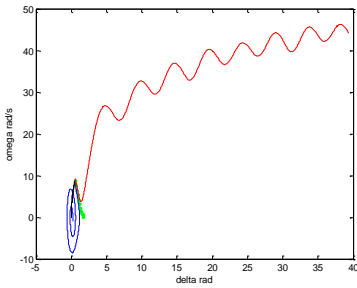
Gambar L.173. Gangguan di titik C



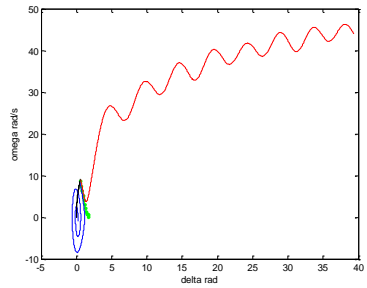
Gambar L.174. Gangguan di titik D



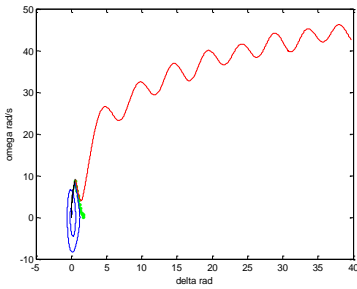
Gambar L.175. Gangguan di titik E



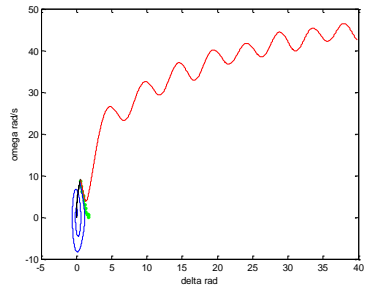
Gambar L.176. Gangguan di titik F



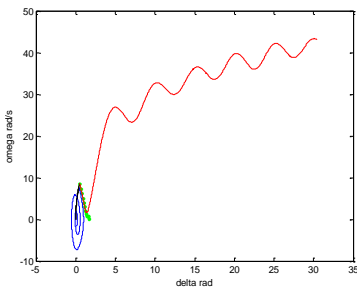
Gambar L.177. Gangguan di titik G



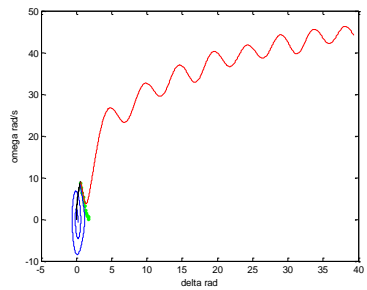
Gambar L.178. Gangguan di titik H



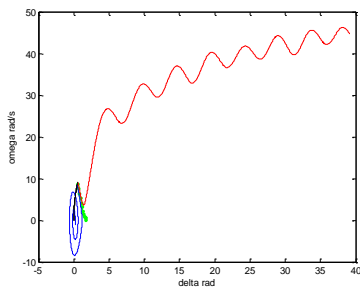
Gambar L.179. Gangguan di titik I



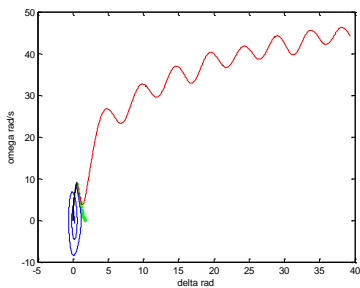
Gambar L.180. Gangguan di titik J



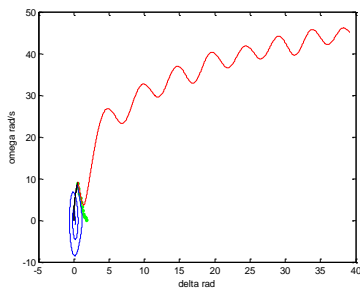
Gambar L.181. Gangguan di titik K



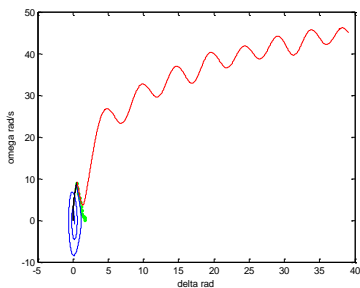
Gambar L.182. Gangguan di titik L



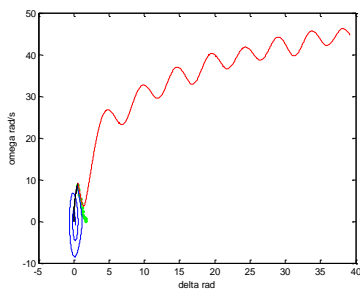
Gambar L.183. Gangguan di titik M



Gambar L.184. Gangguan di titik N

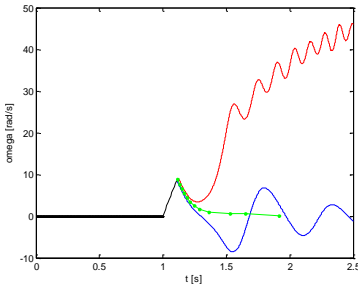


Gambar L.185. Gangguan di titik O

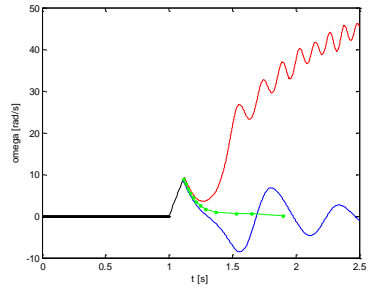


Gambar L.186. Gangguan di titik P

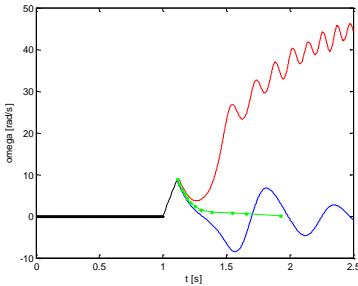
***XIX.* Grafik Sistem IEEE57 7 generator 57 Bus Akibat
Hubung Singkat Dua Fasa Langsung antara Kecepatan
Sudut Rotor[ω] terhadap waktu [t]**



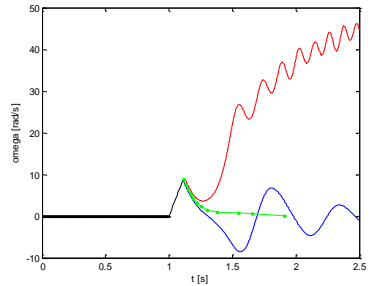
Gambar L.187. Gangguan di titik A



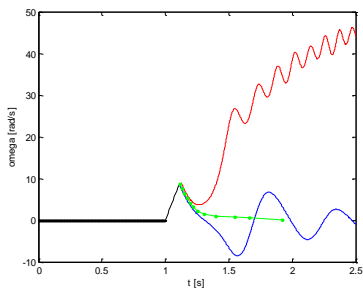
Gambar L.188. Gangguan di titik B



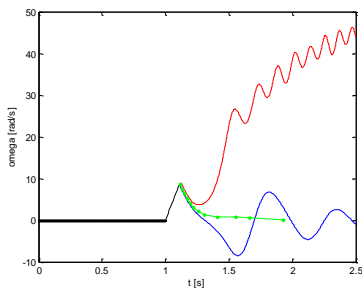
Gambar L.189. Gangguan di titik D



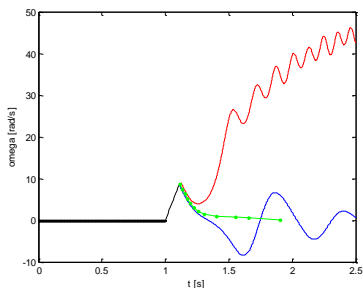
Gambar L.190. Gangguan di titik E



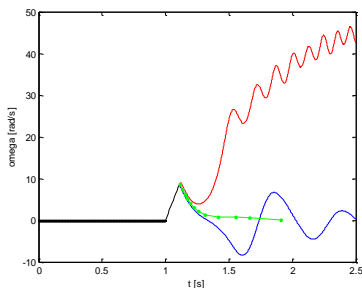
Gambar L.191. Gangguan di titik F



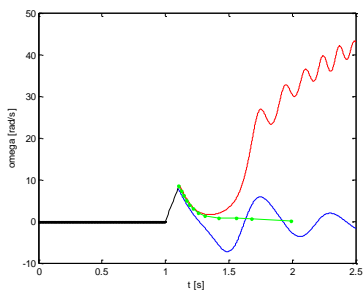
Gambar L.192. Gangguan di titik G



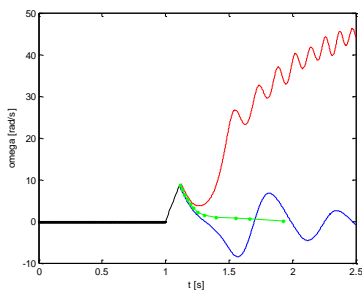
Gambar L.193. Gangguan di titik H



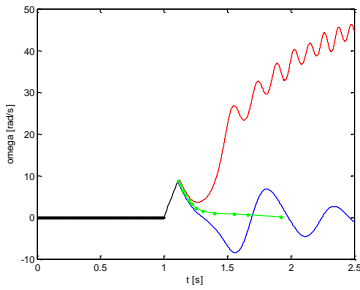
Gambar L.194. Gangguan di titik I



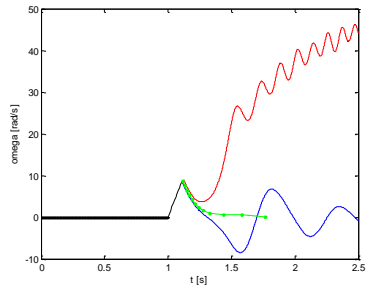
Gambar L.195. Gangguan di titik J



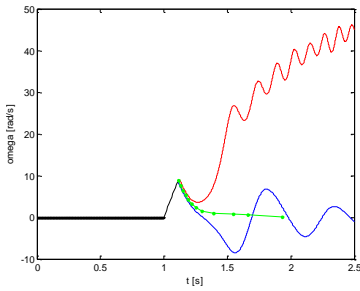
Gambar L.196. Gangguan di titik K



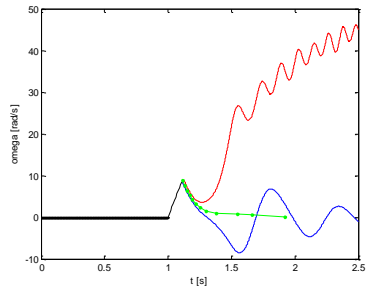
Gambar L.197. Gangguan di titik L



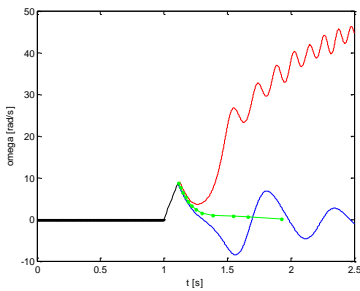
Gambar L.198. Gangguan di titik M



Gambar L.199. Gangguan di titik N

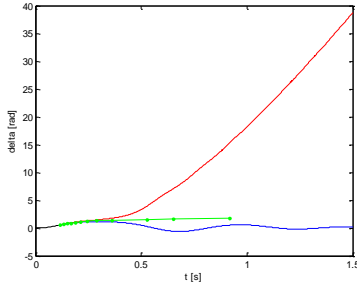


Gambar L.200. Gangguan di titik O

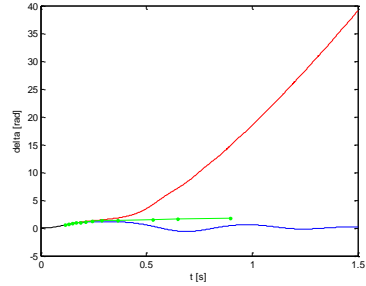


Gambar L.201. Gangguan di titik P

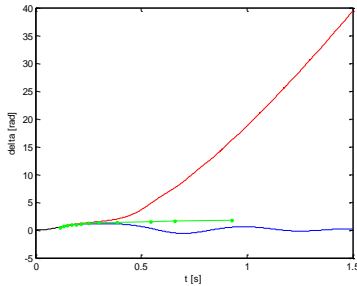
XX. Grafik Sistem IEEE57 7 generator 57 Bus Akibat Hubung Singkat Dua Fasa Langsung antara Sudut Rotor[δ] terhadap waktu [t]



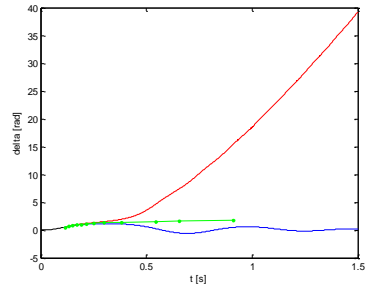
Gambar L.202. Gangguan di titik B



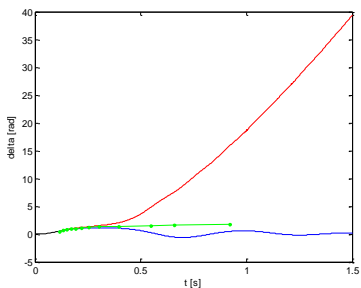
Gambar L.203. Gangguan di titik C



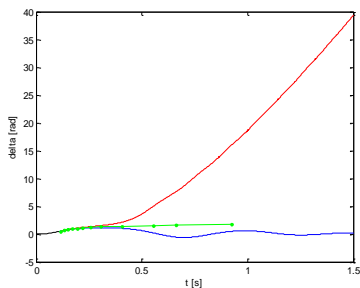
Gambar L.204. Gangguan di titik D



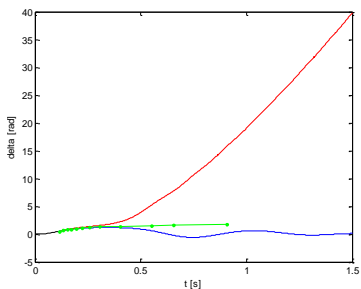
Gambar L.205. Gangguan di titik E



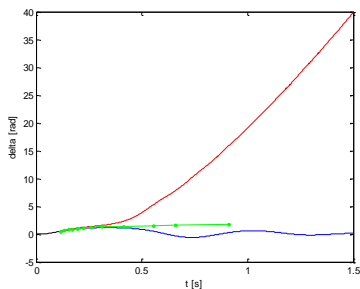
Gambar L.206. Gangguan di titik F



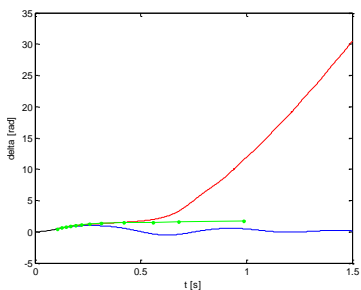
Gambar L.207. Gangguan di titik G



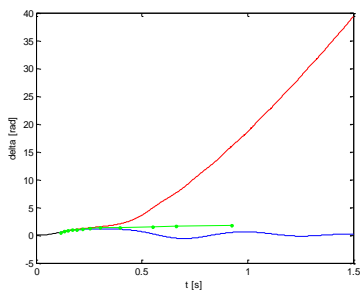
Gambar L.208. Gangguan di titik H



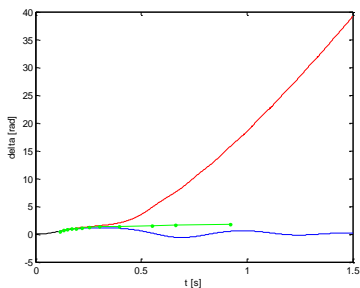
Gambar L.209. Gangguan di titik I



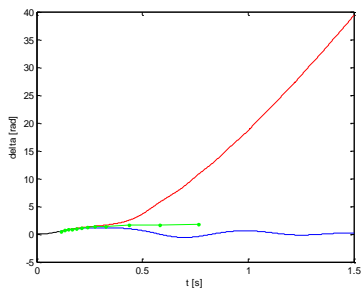
Gambar L.210. Gangguan di titik J



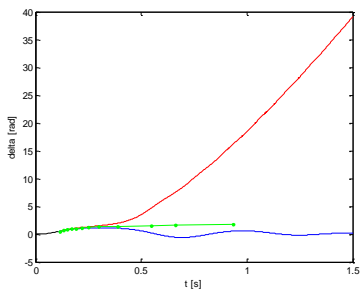
Gambar L.211. Gangguan di titik K



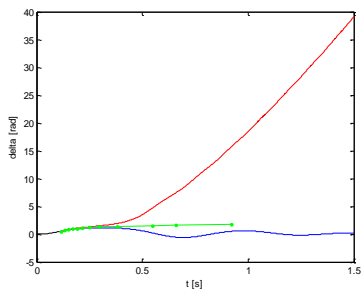
Gambar L.212. Gangguan di titik L



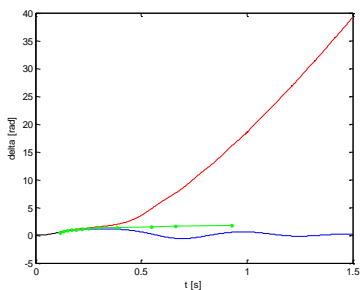
Gambar L.213. Gangguan di titik M



Gambar L.214. Gangguan di titik N

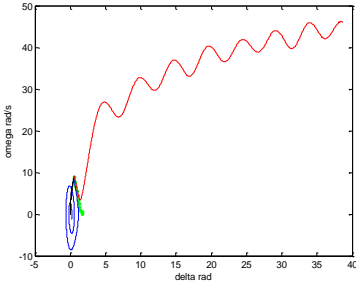


Gambar L.215. Gangguan di titik O

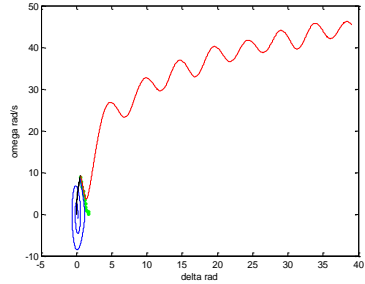


Gambar L.216. Gangguan di titik P

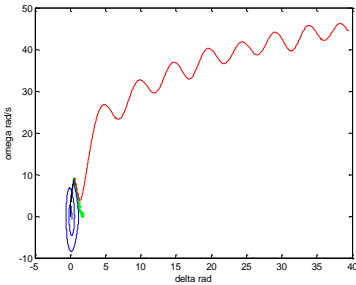
XXI. Grafik Sistem IEEE57 7 generator 57 Bus Akibat Hubung Singkat Dua Fasa Langsung antara Kecepatan Sudut Rotor[ω] terhadap Sudut Rotor [δ]



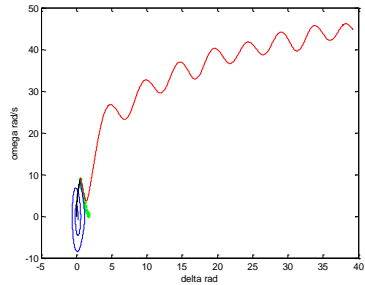
Gambar L.217. Gangguan di titik B



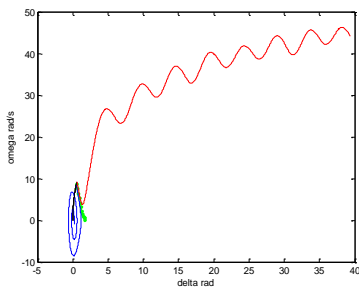
Gambar L.218. Gangguan di titik C



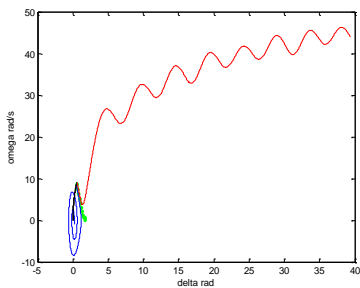
Gambar L.219. Gangguan di titik D



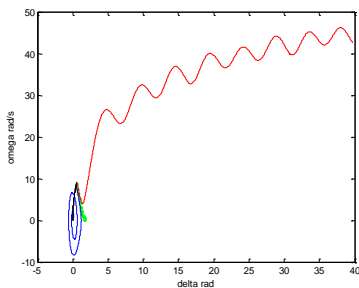
Gambar L.220. Gangguan di titik E



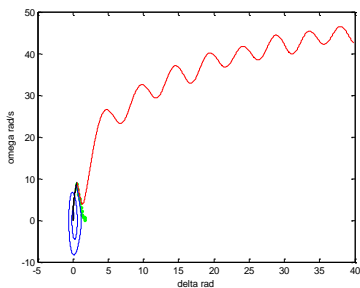
Gambar L.221. Gangguan di titik F



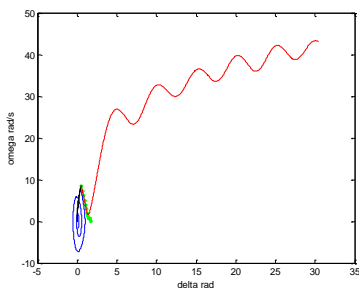
Gambar L.222. Gangguan di titik G



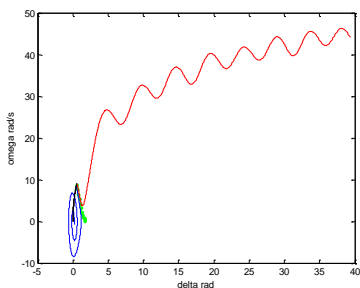
Gambar L.223. Gangguan di titik H



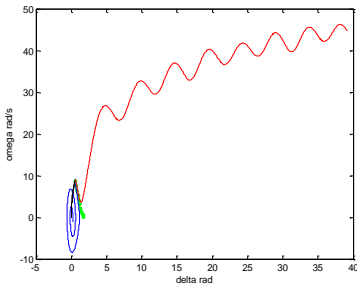
Gambar L.224. Gangguan di titik I



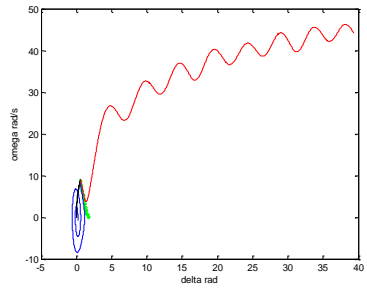
Gambar L.225. Gangguan di titik J



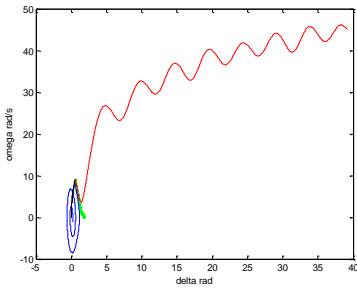
Gambar L.226. Gangguan di titik K



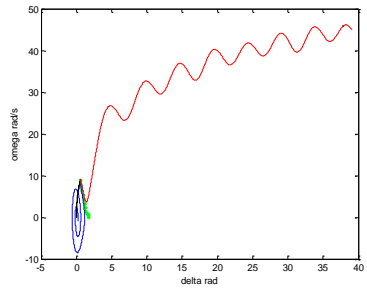
Gambar L.227. Gangguan di titik L



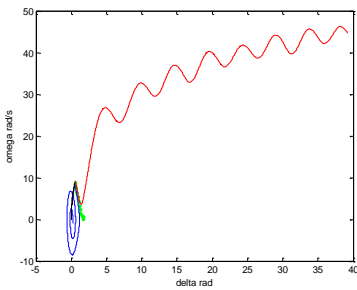
Gambar L.228. Gangguan di titik M



Gambar L.229. Gangguan di titik N

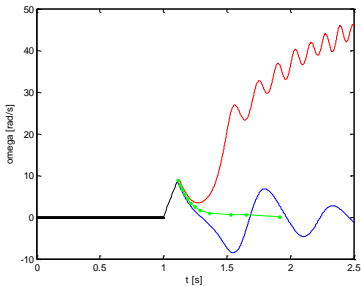


Gambar L.230. Gangguan di titik O

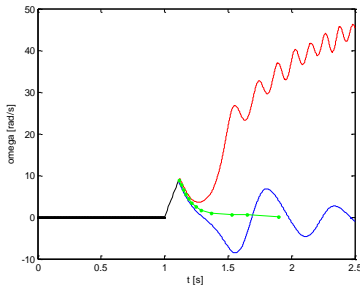


Gambar L.231. Gangguan di titik P

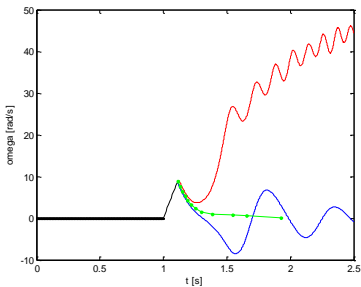
XXII. Grafik Sistem IEEE57 7 generator 57 Bus Akibat Hubung Singkat Tiga Fasa antara Kecepatan Sudut Rotor[ω] terhadap waktu [t]



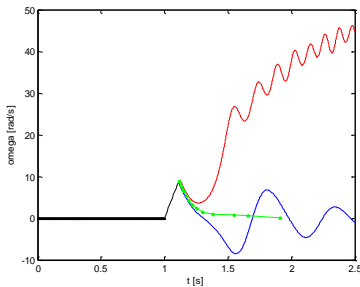
Gambar L.232. Gangguan di titik A



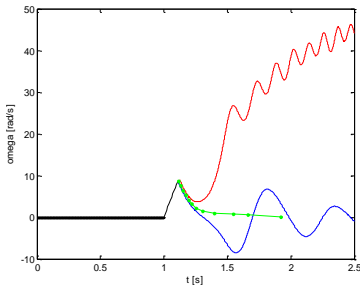
Gambar L.233. Gangguan di titik B



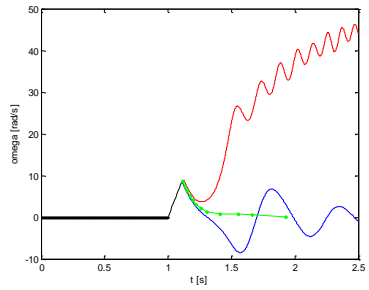
Gambar L.234. Gangguan di titik C



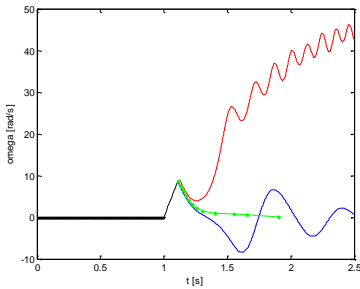
Gambar L.235. Gangguan di titik E



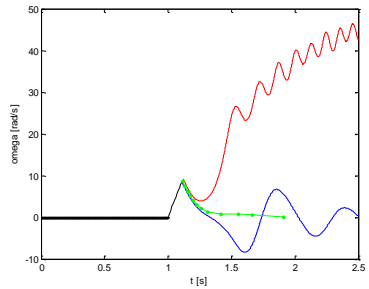
Gambar L.236. Gangguan di titik F



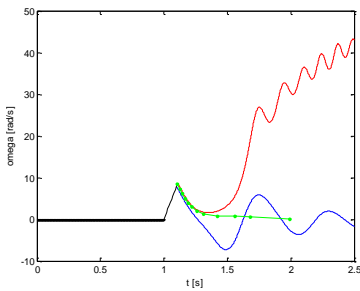
Gambar L.237. Gangguan di titik G



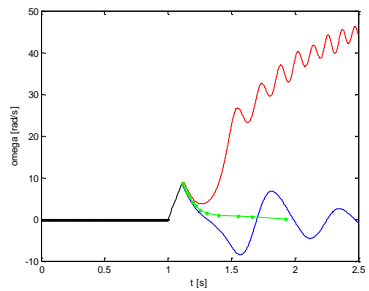
Gambar L.238. Gangguan di titik H



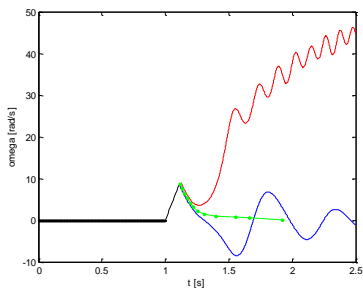
Gambar L.239. Gangguan di titik I



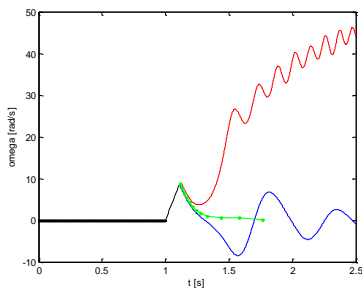
Gambar L.240. Gangguan di titik J



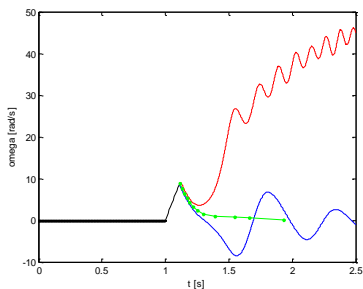
Gambar L.241. Gangguan di titik K



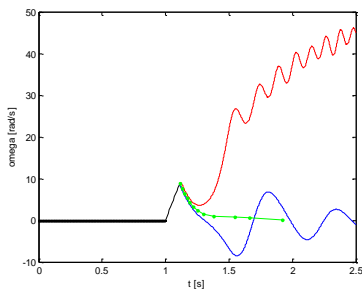
Gambar L.242. Gangguan di titik L



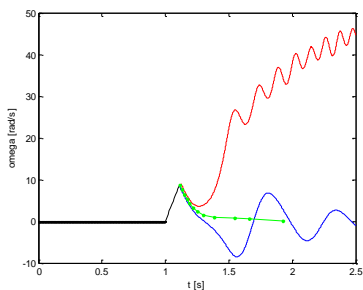
Gambar L.243. Gangguan di titik M



Gambar L.244. Gangguan di titik N

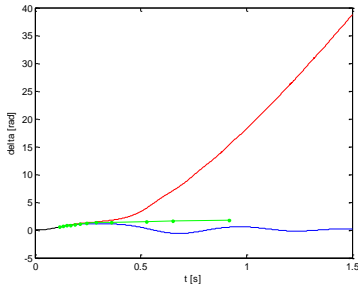


Gambar L.245. Gangguan di titik O

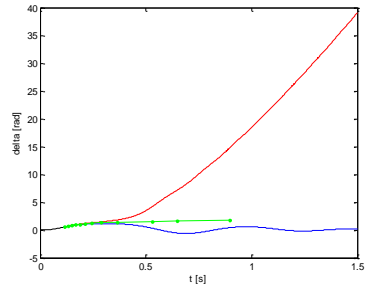


Gambar L.246. Gangguan di titik P

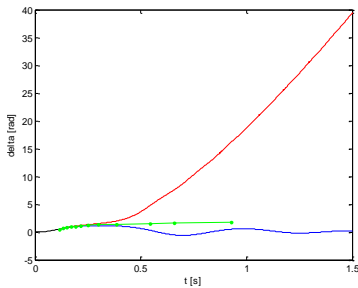
XXIII. Grafik Sistem IEEE57 7 generator 57 Bus Akibat Hubung Singkat Tiga Fasa antara Sudut Rotor[δ] terhadap waktu [t]



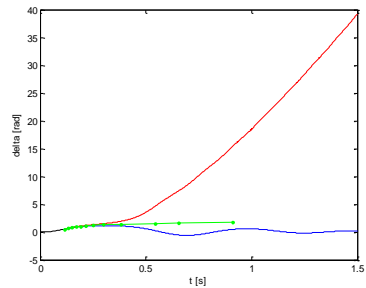
Gambar L.247. Gangguan di titik A



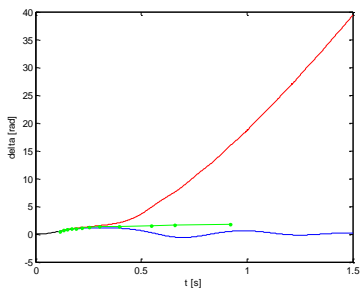
Gambar L.248. Gangguan di titik B



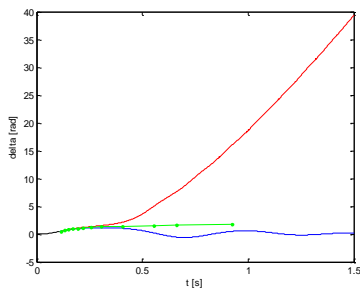
Gambar L.249. Gangguan di titik C



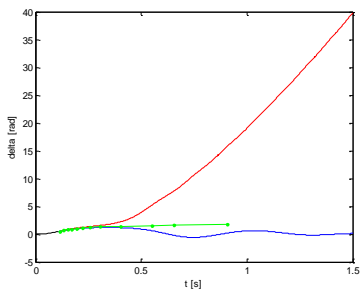
Gambar L.250. Gangguan di titik E



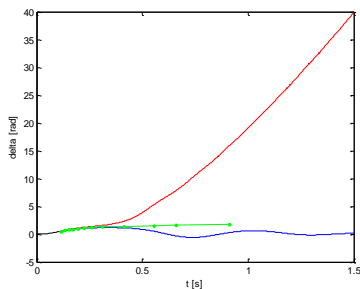
Gambar L.251. Gangguan di titik F



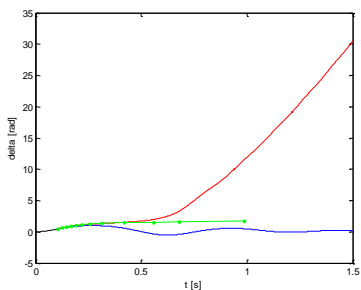
Gambar L.252. Gangguan di titik G



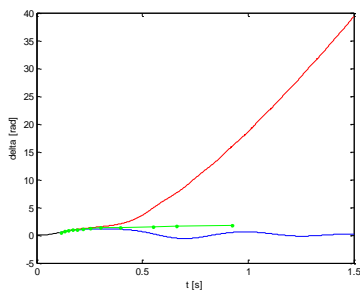
Gambar L.253. Gangguan di titik H



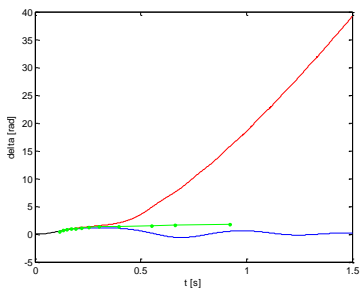
Gambar L.254. Gangguan di titik I



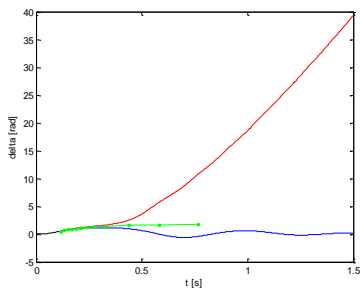
Gambar L.255. Gangguan di titik J



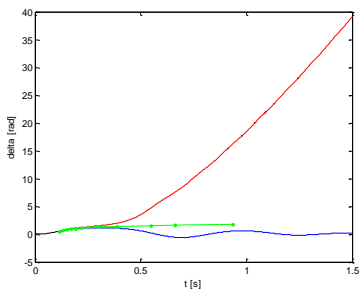
Gambar L.256. Gangguan di titik K



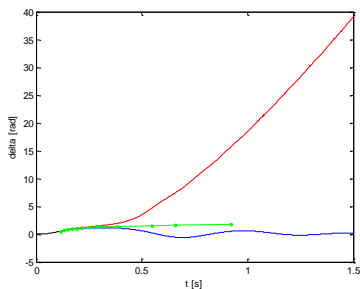
Gambar L.257. Gangguan di titik L



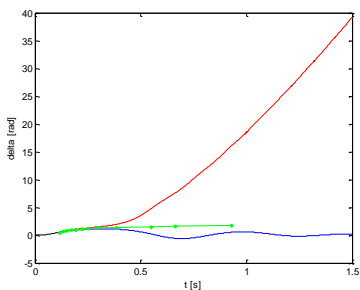
Gambar L.258. Gangguan di titik M



Gambar L.259. Gangguan di titik N

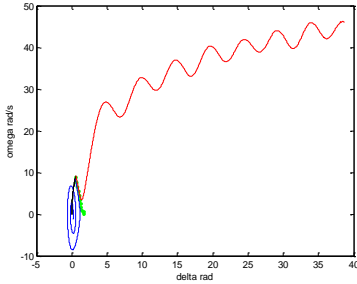


Gambar L.260. Gangguan di titik O

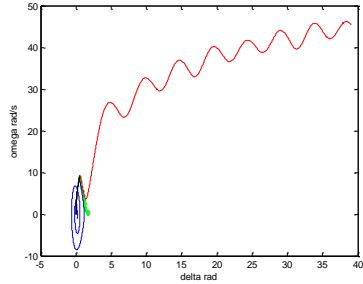


Gambar L.261. Gangguan di titik P

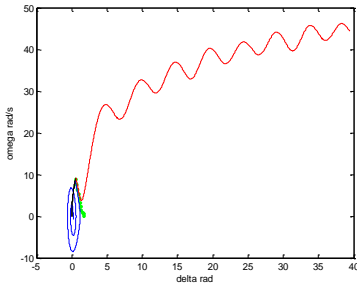
XXIV. Grafik Sistem IEEE57 7 generator 57 Bus Akibat Hubung Singkat Tiga Fas antara Kecepatan Sudut Rotor $[\omega]$ terhadap Sudut Rotor $[\delta]$



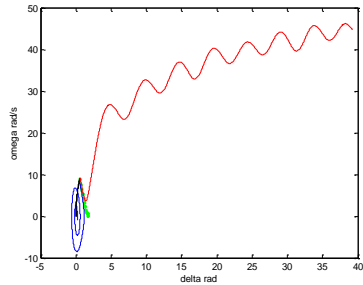
Gambar L.262. Gangguan di titik B



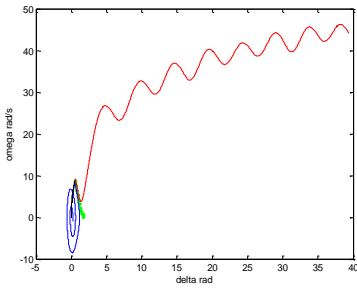
Gambar L.263. Gangguan di titik C



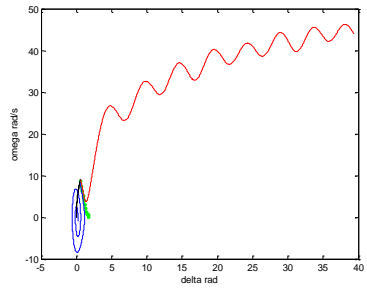
Gambar L.264. Gangguan di titik D



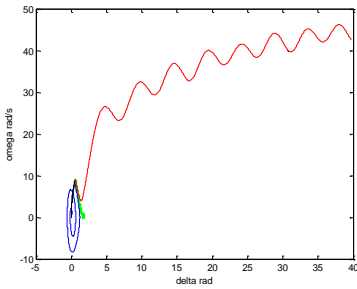
Gambar L.265. Gangguan di titik E



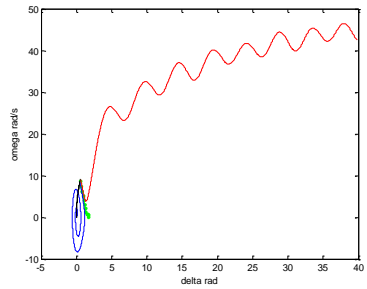
Gambar L.266. Gangguan di titik F



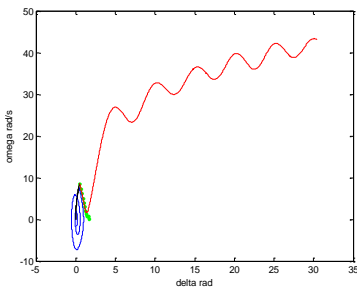
Gambar L.267. Gangguan di titik G



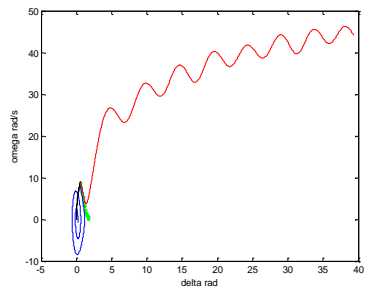
Gambar L.268. Gangguan di titik H



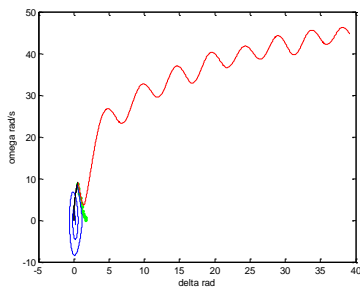
Gambar L.269. Gangguan di titik I



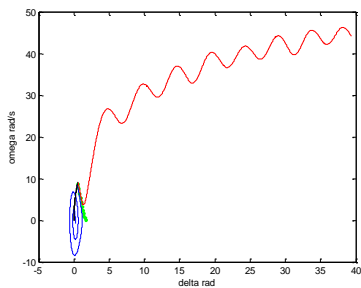
Gambar L.270. Gangguan di titik J



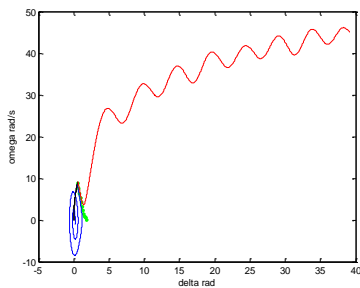
Gambar L.271. Gangguan di titik K



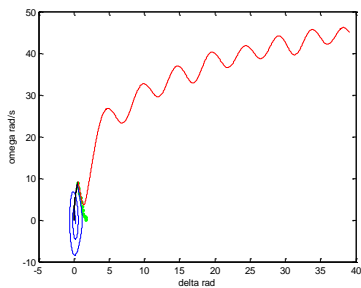
Gambar L.272. Gangguan di titik L



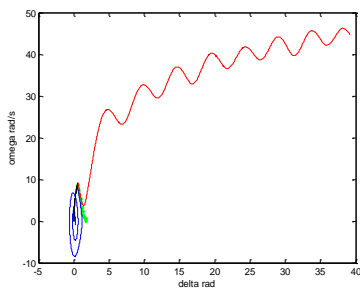
Gambar L.138273 Gangguan di titik M



Gambar L.274. Gangguan di titik N



Gambar L.275. Gangguan di titik O



Gambar L.276. Gangguan di titik P

